

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESTR. 10/16/95
8
2ej

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE MODELOS
MATEMÁTICOS APLICANDO TÉCNICAS
DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS**

JORGE HUMBERTO PÉREZ ROLDÁN

TESIS

Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la
FACULTAD DE INGENIERÍA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Como requisito para obtener
el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

DIRECTOR DE TESIS: DAVID MURIA VILA

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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

1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos y alcances	2
2. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	
2.1 Conceptos generales	4
2.2 Función criterio	8
2.3 Técnicas de identificación	10
3. METODOLOGÍAS	
3.1 Planteamiento de estado	18
3.2 Planteamiento modal	21
3.3 Índice de error	24
3.4 Modelos considerados	24
4. SIMULACIONES	
4.1 Características de los registros	36
4.2 Análisis no paramétrico simplificado	38
4.3 Estrategias de estimación paramétrica	39
4.4 Simulación con ruido blanco	41
4.5 Simulación con registros sísmicos del edificio Jal	46
4.6 Comentarios	49
5. APLICACIONES EN EL EDIFICIO JAL	
5.1 Descripción del edificio	78
5.2 Instrumentación sísmica	79
5.3 Análisis no paramétrico simplificado	81
5.4 Análisis paramétrico con los planteamientos de estado y modal	82
5.5 Comentarios	85
6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	116

7. REFERENCIAS		119
NOMENCLATURA		124
APÉNDICE A	Planteamiento de estado de los modelos matemáticos	127
APÉNDICE B	Eficiencia del modelo de siete grados de libertad tridimensional	138

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Debido a la incertidumbre que se tiene del comportamiento dinámico real de los sistemas estructurales y de los modelos matemáticos que lo idealizan, se han llevado a cabo una serie de investigaciones durante los últimos años con base en análisis de identificación de sistemas utilizando registros sísmicos captados de varias estructuras instrumentadas (Safak, 1989; Li y Mau, 1991; González et al., 1993).

El estudio de la respuesta dinámica en los edificios es un problema directo, es decir, se desarrollan modelos matemáticos con base en programas de análisis estructural y se emplean registros experimentales de aceleración para utilizarlos como excitación en la base del modelo. Después de hacer el análisis estructural, se comparan las respuestas del modelo con las experimentales, y si la correlación es buena se considera el modelo adecuado, de lo contrario éste se modificará a partir de consideraciones de análisis congruentes con la estructura, sin forzarlo ni ajustar ningún valor, hasta lograr una correlación adecuada. Este proceso en ciertas ocasiones conduce a diferencias significativas en algunos parámetros, de ahí la importancia de abordar otras alternativas para identificar las características estructurales del sistema.

Aún se tienen grandes incertidumbres en la estimación de los parámetros estructurales con base en las formulaciones propuestas por los códigos de construcción para estructuras sismorresistentes. Los efectos con mayor incertidumbre son los relacionados con la interacción suelo-estructura, la torsión, la degradación de rigidez y resistencia y la contribución de los elementos no estructurales, como se ha evidenciado en el comportamiento estructural durante los últimos eventos sísmicos ocurridos en diferentes partes del mundo (Rosenblueth y Meli, 1986; EERI, 1990; EERI, 1994; EERI, 1995), por lo tanto es difícil definir modelos estructurales exclusivamente con un planteamiento teórico debido a todas las incertidumbres existentes, tanto de la estimación de los parámetros como del comportamiento real de los sistemas estructurales. Para contrarrestar lo anterior se utilizan diversas

técnicas de identificación de sistemas para obtener los parámetros estructurales y evaluar el comportamiento de las estructuras.

El análisis paramétrico en el área estructural surgió de la necesidad de interpretar registros sísmicos de edificios. Este tipo de análisis utiliza un problema inverso al convencionalmente utilizado en el análisis estructural, es decir los modelos matemáticos se alimentan con respuestas experimentales registradas en los sistemas estructurales, con el fin de calcular los parámetros que rigen dicho comportamiento.

La aplicación de estas técnicas de identificación se ha incrementado mucho durante los últimos años en el área de la ingeniería estructural para tener una descripción más adecuada de las estructuras y de sus propiedades dinámicas, y así poder estimar las respuestas reales de los edificios sujetos ante diferentes tipos de excitación (Beck y Jennings, 1980; Miranda y Bertero, 1993; Safak, 1993; Durrani et al., 1994). Además, otra finalidad muy importante de la aplicación de estas técnicas de identificación en edificios instrumentados radica en poder tener un seguimiento de su comportamiento ante la acción de movimientos sísmicos y detectar los cambios en los parámetros; esto ofrece la oportunidad de hacer un estudio cuantitativo del comportamiento estructural para diferentes amplitudes de esfuerzo y deformación, lo que es verdaderamente relevante para evaluar y establecer criterios de diseño para concebir estructuras sismorresistentes.

1.2 Objetivos y alcances

Se desarrollarán modelos matemáticos simplificados de sistemas lineales e invariantes en el tiempo y se evaluará su eficiencia para determinar los parámetros estructurales de edificios instrumentados a partir de análisis de identificación de sistemas.

Se aplicarán dos planteamientos diferentes de las ecuaciones de equilibrio dinámico para realizar la identificación de sistemas, un planteamiento de estado (DeCarlo, 1989; Ljung, 1987) y un planteamiento modal (Beck y Jennings, 1980). Con estos dos planteamientos y utilizando diversos modelos matemáticos se llevarán a cabo varias simulaciones utilizando diferentes estrategias con base en el método de mínimos

cuadrados para el análisis paramétrico (Marquardt, 1963; Dennis y Schanabel, 1983), con el propósito de obtener la mayor cantidad de información posible de los registros sísmicos y así comprender un poco más el comportamiento estructural de los edificios ante eventos sísmicos.

Además, se evaluará la eficiencia de las dos metodologías utilizadas para la identificación de los parámetros estructurales aplicando un índice de error, el cual indica qué tan bien está hecho el ajuste de las respuestas calculadas con el modelo matemático con respecto a las medidas en el sistema real.

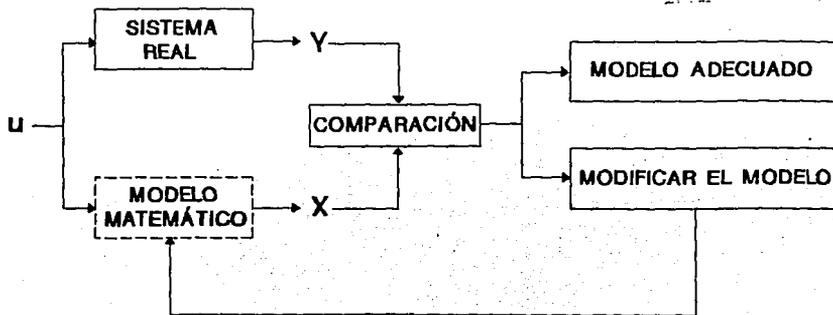
Finalmente se aplicarán las metodologías propuestas en la identificación de parámetros estructurales utilizando registros experimentales obtenidos del edificio Jal.

2. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

2.1 Conceptos generales

Los problemas en la ingeniería estructural se pueden catalogar como problemas directos o inversos (Bekey, 1970; Hart y Yao, 1977).

En los problemas directos se desarrollan modelos matemáticos con base en programas de análisis estructural y se emplean registros de aceleración del terreno para utilizarlos como excitación del modelo. Después de hacer el análisis estructural se comparan las respuestas del modelo con las experimentales y si la correlación es buena, se considera el modelo adecuado, de lo contrario, éste se modificará hasta lograr una correlación adecuada. El éxito en la modificación del modelo depende en gran parte del conocimiento y experiencia que posea el ingeniero estructural. Éste es el problema común en el análisis estructural. La metodología del problema directo se puede apreciar en el siguiente esquema:

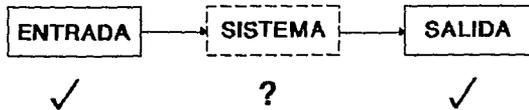


donde:

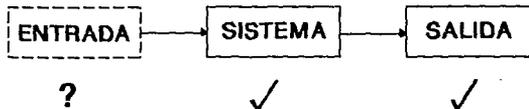
- u Entrada del sistema real y se utiliza para excitar el modelo matemático
- Y Respuesta del sistema real
- X Respuesta del modelo matemático

En el problema inverso, se conoce la respuesta del sistema ante una o varias excitaciones, y se desconocen, bien sea, el sistema, o las entradas de excitación o el modelo matemático que describe el sistema; por lo tanto, existen tres tipos de problemas inversos:

1. **Problema de diseño.** Se conocen unas entradas y salidas, la idea es diseñar un sistema que ajuste dichas señales con base en relaciones físicas. En los problemas de diseño no hay solución única, debido a que existen un gran número de posibles procesos que pueden tener la misma relación entrada-salida. Este problema se puede esquematizar de la siguiente manera:



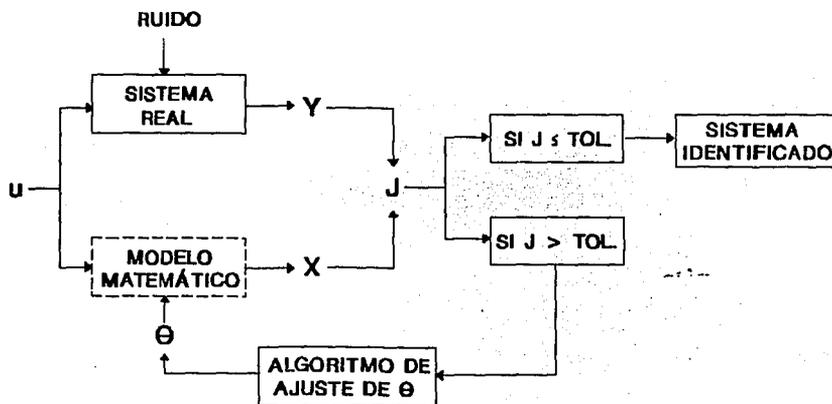
2. **Problema de control.** Se conoce la descripción del sistema y una respuesta, la idea es encontrar la entrada al sistema que causa dicha respuesta. Este problema también se conoce como problema de instrumentación, y se puede esquematizar de la siguiente manera:



3. **Problema de identificación o modelación.** Se conocen varias entradas y sus correspondientes salidas de un sistema, la idea es ajustar los parámetros estructurales de un modelo matemático que describa el sistema.

Este trabajo de tesis trata sobre el estudio y aplicación del problema inverso de identificación de sistemas o modelación. Este problema puede ser separado en dos

categorías dependiendo del conocimiento a priori; es decir, si la naturaleza del proceso es completamente desconocida, se podría designar como un problema de identificación de total ignorancia o caja negra, y si por el contrario se tiene un conocimiento de la naturaleza del problema, y además algunos valores específicos de los parámetros del sistema pueden ser conocidos, estos problemas de identificación se designan como problemas de cajas grises. Generalmente, las ecuaciones que definen el sistema pueden ser deducibles de su comportamiento físico. Es evidente que la mayoría de los problemas de identificación en la ingeniería estructural son del segundo tipo. Una configuración general del problema de identificación de sistemas se puede apreciar en el siguiente esquema:



donde:

- u Entrada del sistema real y se utiliza para excitar el modelo matemático
- Y Respuesta del sistema real
- X Respuesta del modelo matemático
- J Función criterio
- TOL Tolerancia máxima permitida
- Θ Parámetros a identificar.

La identificación de sistemas se puede definir como el proceso para la construcción de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, usando información experimental, en donde se realice un ajuste sistemático de sus parámetros con base en un criterio predefinido, de tal manera que se establezca la mejor correlación posible entre las respuestas predichas por el modelo matemático y las obtenidas experimentalmente.

El proceso de identificación se puede dividir en tres etapas (Bekey, 1970):

- **Determinar la forma del modelo (seleccionar las ecuaciones diferenciales del modelo) y aislar los parámetros desconocidos a identificar**
- **Seleccionar una función (función criterio) en donde se establezca un criterio de error que evalúe el ajuste entre las respuestas del modelo matemático y las del sistema real**
- **Seleccionar un algoritmo o estrategia para el ajuste de los parámetros, de tal forma que minimice las diferencias medidas con la función criterio entre las respuestas del modelo y las del sistema.**

La selección del tipo de modelo es la etapa principal dentro del proceso de identificación. La correlación entre las respuestas del modelo con las experimentales será aceptable siempre y cuando el modelo represente en forma adecuada el sistema estructural y los parámetros identificados se encuentren dentro de un intervalo de valores aceptable. Para la determinación del tipo de modelo, además de tener en cuenta la correlación entre las respuestas, los términos que definen el comportamiento dinámico se deben relacionar directamente con propiedades físicas conocidas. Luego de establecer el tipo de modelo, se seleccionan los parámetros desconocidos a identificar, generalmente asociados a la rigidez y amortiguamiento del sistema.

La segunda etapa del proceso de identificación consiste en establecer una función para evaluar el error entre las respuestas estimadas con el modelo matemático y las obtenidas del sistema real. Finalmente, la tercera etapa del proceso es la de desarrollar un algoritmo que ajuste los parámetros del modelo matemático, con el fin de minimizar el error evaluado por la función criterio.

Existe un gran número de métodos de identificación de sistemas y sus respectivas aplicaciones en la ingeniería estructural. En la literatura hay varios artículos que hacen un análisis bibliográfico sobre dichas técnicas y sus respectivas aplicaciones, entre ellos están los de Hart y Yao, 1977; Kozin y Natke, 1986 y Natke, 1990.

2.2 Función criterio

Un modelo matemático adecuado es aquel capaz de reproducir respuestas iguales o cercanas a las respuestas registradas por un sistema real, cuando ambos son sometidos a la misma excitación.

La función criterio (J) es una función integral que evalúa el error cuadrático de la diferencia de las respuestas del modelo matemático con las del sistema real, e indica que tan bien está hecho el ajuste entre dichas respuestas. La razón por la cual se elige una función que evalúa el error cuadrático es porque la distribución que generan las diferencias cuadráticas de las respuestas del modelo con las del sistema es gaussiana, y esto facilita la minimización del valor medio cuadrático de cada parámetro a identificar. Además, dado que los algoritmos de ajuste más usados para la identificación de sistemas utilizan solamente su primera derivada con respecto a los parámetros a identificar, así logran una función lineal de rápida convergencia cerca del mínimo (González et al., 1993).

Existen diferentes tipos de funciones criterio. Algunas evalúan el error cuadrático solamente de las aceleraciones, otras tienen en cuenta los errores de desplazamiento y velocidad, y también hay funciones que evalúan el error cuadrático de los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones.

Si θ es el vector de parámetros y T es el intervalo de integración, algunas de las funciones criterio se podrían escribir así:

$$J(\theta, T) = \int_0^T ([\hat{x}(\theta, t) - \hat{y}(t)]^2) dt$$

$$J(\theta, T) = \int_0^T ([\dot{x}(\theta, t) - \dot{y}(t)]^2 + [x(\theta, t) - y(t)]^2) dt$$

$$J(\theta, T) = \int_0^T ([\ddot{x}(\theta, t) - \ddot{y}(t)]^2 + [\dot{x}(\theta, t) - \dot{y}(t)]^2 + [x(\theta, t) - y(t)]^2) dt$$

donde:

$\ddot{x}(\theta, t)$, $\dot{x}(\theta, t)$ y $x(\theta, t)$ son las respuestas de aceleración, velocidad y desplazamiento calculadas con el modelo matemático utilizando el vector de parámetros θ

$\ddot{y}(t)$, $\dot{y}(t)$ y $y(t)$ son las respuestas de aceleración, velocidad y desplazamiento registradas experimentalmente por el sistema real

Las respuestas calculadas por el modelo matemático se obtienen con la aceleración de excitación $\ddot{x}_y(t)$ registrada por el sistema real. El límite inferior de la integración corresponde a las condiciones iniciales del problema de identificación.

Existen funciones criterio, en que las diferencias de las respuestas del modelo matemático con las experimentales pueden tener diferentes pesos al hacer el ajuste. Estos pesos dependen de las unidades que tienen las diferencias entre las respuestas, del nivel de ruido y de la importancia que se le desee asignar a cada diferencia. Por ejemplo, en el análisis de sistemas estructurales de edificios instrumentados, las señales registradas en la azotea pueden tener un mayor peso en el ajuste que las registradas en la base, debido a que la relación ruido a señal es menor en las señales de la azotea. Así mismo, el peso que se le da a la diferencia entre los desplazamientos puede ser mayor, dado que éstos generalmente se asocian con el nivel de daño que se presenta en el sistema estructural.

Para la estimación de parámetros se debe seleccionar un algoritmo que sistemáticamente ajuste los parámetros en el modelo matemático, hasta que la función criterio se minimice. Se podría imaginar que la función criterio esta descrita por una superficie de n dimensiones dentro de un espacio de $n + 1$ dimensiones. Por lo tanto, cada conjunto de n parámetros proporciona un punto (error) en la superficie. Así pues,

el objetivo consiste en encontrar las coordenadas (parámetros) del punto mínimo de la superficie.

La convergencia de muchos algoritmos utilizados para minimizar la función criterio dependen de la estimación de los parámetros iniciales, debido a que la superficie de n dimensiones tiene un solo mínimo global y puede tener muchos mínimos locales. Por lo tanto, si se seleccionan erróneamente los parámetros iniciales, el algoritmo puede converger a un mínimo local, y así no cumplir con el objetivo final de encontrar el mínimo global de la superficie.

2.3 Técnicas de identificación

La metodología general de la identificación de sistemas estructurales ha sido desarrollada en las dos últimas décadas (Udwadia y Marmarelis, 1976; Hart y Yao, 1977; Torkamani y Hart, 1978; Beck, 1979; Kozin y Natke, 1986) y recientemente se han introducido nuevas técnicas utilizando algoritmos recursivos (Hoshiya y Saito, 1984; Safak, 1989; Imai et al., 1989). En esta sección se presentarán solamente las técnicas de identificación de sistemas más utilizadas en la ingeniería estructural. Muchas de estas técnicas han tenido éxito al identificar propiedades de sistemas estructurales equivalentes, lineales e invariantes en el tiempo, y la mayoría de ellas han sido verificadas utilizando modelos matemáticos simulados en computador. Además, varios algoritmos han sido revisados y aplicados a la identificación de sistemas estructurales sujetos a excitaciones sísmicas, y también utilizando datos obtenidos en laboratorio bajo condiciones controladas (Ghanem y Shinozuka, 1995).

Para hacer el ajuste de los parámetros, existen una gran cantidad de métodos con diferentes teorías de optimación matemática. Sin embargo, el principal problema de algunos de ellos es la convergencia hacia los parámetros reales. Los métodos para la estimación de parámetros se pueden dividir dentro de dos grupos (Ljung, 1987):

- **Métodos Iterativos.** Consiste en asignar valores iniciales a los parámetros a identificar y evaluar la función que determina el error para todo el intervalo de muestreo, de tal forma que iterativamente se busque el mínimo de la función.

Algunos métodos para evaluar la función que determina el error son: mínimos cuadrados y los de máxima verosimilitud. Para la estrategia de minimización se utilizan métodos como el de Newton, Newton-Raphson y Gauss-Newton

- **Métodos Recursivos.** El ajuste de los parámetros se realiza en cada intervalo de tiempo. Se aplica principalmente para el estudio de sistemas con parámetros variables en el tiempo. La estrategia más utilizada es la del Filtro de Kalman (Kalman, 1960).

Por otro lado, aún falta mucho por investigar y desarrollar acerca de la identificación de relaciones no lineales entre las entradas y salidas medidas de un sistema estructural. Debido a esta limitante, la identificación de sistemas se ha enfocado a desarrollar modelos simplificados de sistemas estructurales, lineales y aplicables de cierto modo a sistemas reales no lineales (Imai et al., 1989).

Los algoritmos de identificación de sistemas se dividen en dos categorías: técnicas en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia (Kozin y Natke, 1986). En el dominio del tiempo son importantes las técnicas relacionadas con la estimación de parámetros basadas en mínimos cuadrados, máxima verosimilitud, técnicas recursivas, etc., y en el dominio de la frecuencia son importantes las técnicas relacionadas con estimativos espectrales, características frecuenciales y descomposición modal para identificar los parámetros estructurales.

Los algoritmos en el dominio de la frecuencia han sido más populares, principalmente debido a su simplicidad y también por razones históricas (Davies y Hammond, 1984; Ljung, 1986). Sin embargo, los algoritmos en el dominio del tiempo han sido muy aplicados últimamente para identificar sistemas estructurales empleando modelos lineales. Al realizar análisis de identificación de sistemas utilizando algoritmos en el dominio del tiempo, los parámetros que varían con el tiempo deben actualizarse a través del proceso de identificación, es decir, la identificación se debe hacer por tramos y asumir un comportamiento lineal en cada uno de ellos, tomando como valores iniciales para cada tramo los valores finales del inmediato anterior. Además, se han realizado esfuerzos en la identificación de sistemas para desarrollar y validar algoritmos recursivos y otros algoritmos en el dominio del tiempo, capaces de llevar

a cabo la variación de los parámetros en el tiempo (Saridis, 1974; Iserman et al., 1974).

A pesar de que los sistemas estructurales pueden presentar comportamiento no lineal, es más fácil y práctico aplicar modelos lineales por tramos para realizar la identificación de sistemas; por lo tanto, es de gran utilidad en la ingeniería estructural validar las hipótesis utilizadas para hacer identificación de sistemas con los modelos lineales. En este sentido se han realizado esfuerzos para validar dichos procedimientos, tal como se puede apreciar en el artículo técnico escrito por Ghanem y Shinozuka, 1995.

Las técnicas de identificación de sistemas más utilizadas en la ingeniería estructural son:

- **Mínimos Cuadrados Iterativo**

El método de mínimos cuadrados iterativo consiste en realizar un ajuste de los parámetros del modelo utilizando toda la señal del tramo de análisis para lograr las respuestas experimentales. La mayoría de las técnicas de minimización del error de predicción se basan en métodos iterativos, cuyos algoritmos trabajan de la siguiente manera: primero se selecciona un vector de parámetros iniciales θ_0 y el algoritmo selecciona un vector mejorado θ_1 , el cual se ajusta mejor de acuerdo con los datos proporcionados (p. e. las respuestas reales del modelo). El proceso se repite sucesivamente hasta encontrar el vector solución, al cual se le denomina vector minimizado θ_{min} .

Uno de los métodos más simples para resolver problemas de minimización no restringida es el de descenso acelerado. Este método tiene algunas desventajas para las aplicaciones en la estimación de parámetros estructurales, que hacen que la convergencia sea muy lenta al mínimo. Para eliminar estas desventajas, se utiliza el método de Gauss-Newton modificado, cuya ecuación es ampliamente usada en optimación y tiene la ventaja de tener una rápida convergencia cerca del mínimo (Bekey, 1970).

Mínimos Cuadrados Recursivo.

El método consiste en realizar un ajuste de mínimos cuadrados en cada paso de iteración con las respuestas del modelo y del sistema real, para minimizar el error de predicción del modelo cuando trata de reproducir los datos medidos por el sistema real. El algoritmo de este método está publicado en Jazwinski, 1970 y Ljung, 1987. Este algoritmo tiene la ventaja de requerir un menor almacenamiento de los datos en cualquier instante de tiempo con respecto al de mínimos cuadrados iterativo. Además, también requiere de una aproximación de los valores iniciales.

Este método de mínimos cuadrados recursivo se divide asimismo en dos métodos: método de mínimos cuadrados recursivo con memoria exponencial y método de mínimos cuadrados recursivo con ventana rectangular (Goodwin y Payne, 1977). Cada uno de ellos tiene su aplicación particular. El método con memoria exponencial se utiliza cuando se tienen muchas incertidumbres en los parámetros iniciales, los cuales pueden causar errores apreciables en las estimaciones; el efecto de este error se reduce implementando una función exponencial de peso, que le da un menor peso a los datos inmediatamente anteriores en cada paso del proceso de identificación. El segundo método se utiliza cuando el intervalo de muestreo es muy grande y el procedimiento normal se limita por memoria requerida; esta limitante de memoria se debe a que el algoritmo normal requiere el almacenamiento de todos los datos dentro del ancho de la ventana de análisis. Este problema se soluciona colocando una ventana rectangular móvil que descarta datos innecesarios para la estimación de parámetros y requiere solamente almacenar la información restante en la ventana de análisis.

Los métodos de ventana exponencial y ventana rectangular tienden a eliminar los efectos de los valores iniciales en subsiguientes estimativos, y se utilizan principalmente cuando no se tiene información previa del sistema estructural a evaluar.

Los métodos recursivos pueden incluir para la identificación de sistemas modelos de comportamiento estructural que tengan en cuenta la degradación

de rigidez y resistencia del sistema durante un evento sísmico. Esto conduce a una mayor cantidad de parámetros a identificar, y a su vez, puede implicar problemas numéricos y de convergencia debido a la gran cantidad de parámetros necesarios para la identificación de las características estructurales.

Filtro de Kalman Extendido.

Este método es esencialmente un método de estimación de mínimos cuadrados secuencial y se aplica principalmente para la identificación de parámetros que se degradan con el tiempo. Los parámetros del sistema se identifican en una forma recursiva, es decir, filtrando el procedimiento a través del tiempo.

El algoritmo del Filtro de Kalman Extendido proviene del planteamiento de estado de la ecuación de movimiento diferencial, y tanto su desarrollo teórico como sus propiedades de convergencia están bien establecidas (Kalman y Bucy, 1961; Jazwinski, 1970; Yun y Shinozuka, 1980). Este algoritmo se basa en considerar un vector de estado extendido que incluye, en adición al vector de respuesta y sus derivadas todos los parámetros a ser identificados; este planteamiento de estado extendido inicia con una aproximación de los valores iniciales de los parámetros a identificar y los va recursivamente actualizando a medida que se presentan nuevos cambios durante el análisis de identificación.

Algunos aspectos importantes del algoritmo del Filtro de Kalman Extendido es que tiene una matriz de transición en el planteamiento de estado la cual realiza la diferencia entre las respuestas del modelo y las sistema; esta matriz esta en función de los parámetros del movimiento (desplazamientos y velocidades) y de los parámetros físicos a identificar y es linealizada en cada paso de tiempo. Usualmente, esta matriz se obtiene integrando las ecuaciones de movimiento utilizando el método de aceleración lineal. Por lo tanto, la aplicación del Filtro de Kalman Extendido requiere un intervalo de muestreo más pequeño que la mayoría de los otros métodos de estimación paramétrica, debido a que la precisión del método de aceleración lineal depende del tamaño del incremento de tiempo de la integración.

Este algoritmo ha sido programado para estimar parámetros de sistemas lineales con múltiples grados de libertad y sistemas histeréticos de un grado de libertad (Maruyama et al., 1989). Además, el Filtro de Kalman Extendido ha sido aplicado a problemas de identificación de sistemas estructurales utilizando modelos lineales y no-lineales sujetos a excitaciones sísmicas.

Se ha incorporado un procedimiento de iteración global por peso al método del Filtro de Kalman Extendido para ser aplicado a problemas dinámicos estructurales, con el fin de obtener soluciones estables y de rápida convergencia a la solución óptima; el método así integrado recibe el nombre de Filtro de Kalman Extendido con Iteración Local Ponderada (Hoshiya y Sutoh, 1992). Además, el método del Filtro de Kalman Extendido se ha incorporado con el método de elementos finitos para darle un mayor alcance de aplicación dentro de la ingeniería estructural (Hoshiya y Sutoh, 1993).

Finalmente, cabe resaltar que la convergencia del algoritmo y la identificación de sus parámetros dependen de qué tan bien se hayan seleccionado los valores iniciales de estos parámetros. Además, como se mencionó en la técnica de identificación anterior, el Filtro de Kalman Extendido también puede tener problemas numéricos y de convergencia cuando se consideran muchos parámetros durante la identificación de las características estructurales del sistema (Banan y Hjelmstad, 1993).

Minimización Modal

Es un método práctico que ha sido desarrollado e implementado para estimar sistemáticamente parámetros modales de sistemas estructurales, aplicando principalmente modelos lineales e invariantes en el tiempo con registros sísmicos (Beck y Jennings, 1980).

El desarrollo de este método se basa en un modelo básico lineal con amortiguamientos clásicos. El método ha sido extendido para aplicarse en la identificación de parámetros de sistemas estructurales. Los parámetros a evaluar para cada modo generalmente son: frecuencia, amortiguamiento, factores de participación efectivo y sus contribuciones en el desplazamiento y

velocidad. El método de minimización modal saca provecho de la linealidad de las ecuaciones del modelo para obtener un algoritmo que es eficiente numéricamente y tiene propiedades de convergencia confiables (Beck, 1979).

La metodología consiste en estimar inicialmente los parámetros para el primer modo de vibrar del sistema estructural; luego se van adicionando los demás modos, uno por uno, y todos los parámetros modales se estiman nuevamente, y así se continúa sucesivamente hasta que el cambio en la función de ajuste con la adición de otro modo no mejora más la respuesta.

La función criterio es minimizada inicialmente con respecto a los parámetros modales del primer modo, dejando fijos los demás parámetros de los otros modos con sus estimativos iniciales. Luego, utilizando el nuevo estimativo de los parámetros del primer modo y los estimativos iniciales del segundo modo, la función criterio se minimiza con respecto a los parámetros del segundo modo y así sucesivamente. En efecto, los nuevos estimativos de los parámetros modales son calculados de una respuesta modificada, la cual se obtiene restando la contribución de los modos identificados en la respuesta original. Este proceso se hace identificando tantos parámetros modales como sea necesario hasta encontrar una adecuada convergencia hacia el mínimo valor de la función criterio.

Para garantizar unicidad en los modelos lineales cuando se requieren identificar las matrices de rigidez y amortiguamiento, conocida la matriz de masas, se debe medir la respuesta en al menos la mitad de los grados de libertad del modelo. Además, se debe tener un conocimiento previo de los valores iniciales de las matrices a identificar. Si por el contrario, no se tiene dicho conocimiento previo, la unicidad solamente es garantizada si la respuesta se mide en todos los grados de libertad del modelo. En adición, aún cuando los modelos logren unicidad, las matrices de rigidez y amortiguamiento generalmente no pueden ser estimadas confiablemente en muchas aplicaciones, porque éstas son sensibles al ruido presente en los registros. Por lo tanto, la ventaja del método de minimización modal es que las frecuencias modales, los factores de amortiguamiento modal y los factores de participación efectivos en cada punto

de medición pueden ser determinados utilizando modelos lineales sin importar el número de grados de libertad que tenga el sistema estructural. Sin embargo, el efecto del ruido en el método modal limita el número de modos que pueden ser estimados confiablemente, debido a que el deterioro en la relación señal-ruido para los modos superiores es considerable.

Este método ha sido ampliamente utilizado en la identificación de sistemas estructurales instrumentados, principalmente en edificios (Beck y Jennings, 1980; Li y Mau, 1991; Durrani et al., 1994) y en puentes (Werner et al., 1987).

Existen otros métodos disponibles para la estimación de parámetros de sistemas estructurales tales como mínimos cuadrados ponderados (Iserman et al., 1974; Goodwin y Payne, 1977) y la técnica recursiva de máxima verosimilitud (Kashyap, 1970; Saridis, 1974; Yun y Shinozuka, 1980; DiPasquale y Cakmak, 1988; Ljung, 1986). Recientemente se han implementado en el contexto de la ingeniería estructural variaciones en los algoritmos de máxima verosimilitud recursivo (Lee, 1990; Yun et al., 1991) y en el método de minimización modal (Li y Mau, 1990), los cuales han sido utilizados para identificar sistemas estructurales con múltiples entradas y múltiples salidas (sistemas MIMO).

3. METODOLOGÍAS

3.1 Planteamiento de estado

Una forma común de describir sistemas lineales es mediante un planteamiento de estado de las ecuaciones de equilibrio (DeCarlo, 1989; Ljung, 1987). En el planteamiento de estado las relaciones entre las señales de entrada, ruido y salida se definen como un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden o ecuaciones en diferencias, usando un vector auxiliar de estado (Ljung, 1987). Para la mayoría de los sistemas físicos es más fácil construir los modelos matemáticos con un planteamiento continuo en el tiempo, simplemente porque la mayoría de las leyes físicas (p.e. leyes de movimiento de Newton) se expresan de esta forma. Por lo tanto, la ecuación de movimiento de un sistema dinámico lineal con N grados de libertad adquiere la siguiente representación:

$$M \ddot{y}(t) + C \dot{y}(t) + K y(t) = u(t)$$

donde:

M	Matriz de masa del sistema
C	Matriz de amortiguamiento del sistema
K	Matriz de rigidez del sistema
$y(t)$	Vector de desplazamientos
$u(t)$	Vector de fuerzas

Las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez tienen coeficientes constantes a lo largo del tiempo.

Para realizar el planteamiento de estado de la ecuación de movimiento del sistema dinámico lineal se suponen las siguientes variables de estado:

$$x(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix}$$

La ecuación de equilibrio en función de las variables de estado queda descrita de la siguiente manera:

$$\dot{x}(t) = F(\theta) x(t) + G(\theta) u(t)$$

donde:

$F(\theta)$ y $G(\theta)$ son matrices con dimensiones apropiadas ($n \times n$ y $n \times m$, respectivamente, para un estado de n -dimensiones y una entrada de m -dimensiones), así:

$$F(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1} K & -M^{-1} C \end{bmatrix}; \quad G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}$$

$x(t)$ vector de estado
 $u(t)$ variable de entrada
 θ vector de parámetros a identificar

La identificación de parámetros consiste en hallar los valores del vector θ de modo que satisfaga la ecuación de equilibrio en función de las variables de estado y minimice la función criterio (J). Para la minimización de la función criterio generalmente se utiliza el método de Gauss-Newton modificado (Dennis y Schnabel, 1983).

En el planteamiento de estado, el vector de parámetros a identificar (θ) generalmente corresponde a coeficientes físicos de valores desconocidos (p.e. coeficientes de rigidez y amortiguamiento). Además, las variables del vector de estado tienen un significado físico (desplazamiento y velocidad), de tal forma que la información experimental proporcione los valores reales de las variables.

Se debe tener en cuenta que si el modelo utilizado no es adecuado para describir el sistema estructural, la solución del problema inverso puede dar lugar a estimaciones totalmente erróneas de los parámetros. La bondad de los modelos matemáticos que se pueden usar con un planteamiento de estado dependen del número de instrumentos de medición de respuesta sísmica que tenga el sistema estructural y del porcentaje del nivel de ruido que hay en las señales. El número de instrumentos de medición proporciona el número de grados de libertad del modelo y la máxima cantidad de

parámetros que se pueden identificar con un análisis paramétrico, y el porcentaje señal a ruido que tienen los registros indica la confiabilidad en la estimación de dichos parámetros.

Este planteamiento de estado resulta de gran eficiencia en la solución del problema dinámico cuando el amortiguamiento es de tipo viscoso no proporcional, pasando de las ecuaciones de segundo orden a un número doble de ecuaciones de primer orden. Sin embargo, este planteamiento no es único, y para un problema de identificación, los parámetros a estimar normalmente se incluyen como variables de estado dentro del vector de estado (Hoshiya y Saito, 1984). En este caso, la ecuación diferencial ya no es lineal al considerar los parámetros como variables de estado; sin embargo, el problema de identificación se reduce igual que antes a la obtención de los parámetros desconocidos del modelo matemático, de tal forma que satisfaga la ecuación de equilibrio en función de las variables de estado y minimice la función criterio.

Programa de cómputo utilizado. Para llevar a cabo la identificación de parámetros se utilizó el paquete de computadora MATLAB (Matlab, 1992). Este programa es de uso general y tiene una librería especializada de identificación de sistemas, la cual requiere de un planteamiento de estado de las ecuaciones de equilibrio. Se desarrollaron subrutinas para cada modelo matemático, en las cuales se especifican las relaciones que presentan los parámetros con base en el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio de cada sistema. La subrutina de minimización que utiliza el programa se basa en el método de Gauss-Newton modificado.

Debido a que los órdenes de magnitud de los parámetros a evaluar son muy diferentes, éstos se deben escalar de tal forma que tengan un mismo orden de magnitud durante todo el proceso de minimización. Los parámetros se escalan dentro de un mismo orden de magnitud, y al finalizar el proceso de minimización, éstos se multiplican nuevamente por sus factores reales respectivos, para obtener la respuesta identificada del sistema estructural.

3.2 Planteamiento modal

El planteamiento modal también es una forma común de describir sistemas lineales (Beck y Jennings, 1980). Un sistema estructural dentro del planteamiento modal puede ser considerado como un sistema lineal de segundo orden de múltiples grados de libertad. Los parámetros del sistema se determinan usando el método de mínimos cuadrados dentro de la ventana de tiempo considerada para el análisis paramétrico, en la cual, el sistema se supone lineal. Los parámetros a identificar utilizando el planteamiento modal son: frecuencia, amortiguamiento, factores de participación, desplazamiento inicial, velocidad inicial y forma modal para cada modo.

El planteamiento modal, el cual se basa en el método de superposición modal, uno de los métodos más usados en el análisis de la respuesta transitoria de estructuras lineales apoyadas sobre suelo rígido, no es, en rigor, aplicable al estudio de interacción suelo-estructura porque las matrices de rigidez y amortiguamiento del sistema son dependientes de la frecuencia. Dado que el método de superposición modal tiene como hipótesis que la matriz de amortiguamiento cumple con las condiciones de ortogonalidad, el planteamiento modal da buenos resultados cuando el amortiguamiento del sistema suelo-estructura es pequeño (Bielak, 1975).

El método de superposición modal se utiliza para transformar un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, correspondiente a un sistema dinámico lineal de N grados de libertad, en un nuevo conjunto de N ecuaciones diferenciales desacopladas, en el que cada ecuación contiene sólo una variable dependiente en función del tiempo. Por lo tanto, este método reduce el problema de encontrar la respuesta de un sistema de N grados de libertad a la determinación de N respuestas de sistemas de un sólo grado de libertad (Clough y Penzien, 1975).

Los registros de aceleración de respuesta medidos en el sistema estructural se denotan por a_{oi} , $i = 1, 2, \dots, n$ y los registros de aceleración de excitación se denotan por a_{ok} , $k = 1, 2, \dots, m$. Se asume que la respuesta a_{oi} representa las aceleraciones relativas del sistema con respecto a las aceleraciones de excitación del terreno a_{ok} . Utilizando el planteamiento modal, la aceleración calculada a_i en términos sus respuestas modales \tilde{y}_j se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$a_i = \sum_j \phi_{ij} \dot{y}_j$$

donde:

ϕ_{ij} son los componentes de la forma modal del modo j en la posición i

Las respuestas modales se definen por la siguiente ecuación de segundo orden para sistemas con amortiguamientos clásicos:

$$\ddot{y}_j + 2 \xi_j \omega_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = \sum_k p_{jk} a_{gk}$$

donde:

ξ_j fracción de amortiguamiento crítico de modo j

ω_j frecuencia natural del modo j , expresada en rad/s

p_{jk} factor de participación del modo j con respecto a la excitación k

La solución a la ecuación anterior puede ser expresada en términos de la integral de Duhamel:

$$\begin{aligned} \dot{y}_j = & e^{-\xi_j \omega_j t} \{ [-2 \xi_j \omega_j \dot{y}_j(0) - \omega_j^2 y_j(0)] \cos \omega_{dj} t \\ & + \frac{1}{\omega_{dj}} [-\omega_j^2 (1 - 2 \xi_j^2) \dot{y}_j(0) + \xi_j \omega_j^3 y_j(0)] \operatorname{sen} \omega_{dj} t \} \\ & + \sum_k p_{jk} \left\{ a_{gk}(t) + \frac{1}{\omega_{dj}} \int_0^t a_{gk}(\tau) e^{-\xi_j \omega_j (t-\tau)} [-2 \xi_j \omega_j \omega_{dj} \right. \\ & \left. \times \cos \omega_{dj} (t - \tau) - \omega_j^2 (1 - 2 \xi_j^2) \operatorname{sen} \omega_{dj} (t - \tau)] d\tau \right\} \end{aligned}$$

donde:

ω_{dj} frecuencia amortiguada y es igual a $\omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$

$\dot{y}_j(0)$ velocidad modal inicial

$y_j(0)$ desplazamiento modal inicial

El cálculo de la integral de Duhamel se basa en obtener la solución analítica exacta de esta integral para la función de excitación $a_{gk}(t)$, suponiendo que está representada por segmentos lineales sucesivos espaciados cada intervalo de tiempo Δt . La introducción de las condiciones iniciales como parámetros desconocidos hace posible realizar la identificación por tramos, asumiendo un comportamiento lineal en cada uno de ellos y tomando como valores iniciales para cada tramo, los finales del inmediato anterior. Este tipo de análisis se hace para identificar parámetros de sistemas estructurales que varían con el tiempo.

El procedimiento modal también utiliza el método de mínimos cuadrados para la identificación de sistemas (Hsia, 1977; Beck y Jennings, 1980), el cual realiza la minimización de la función criterio con respecto a los parámetros modales a identificar ω_j , ξ_j , P_{jk} , $y_j(0)$, $\dot{y}_j(0)$ y Φ_{1j} . La minimización de dicho error se obtiene usando el método modificado de Levenberg-Marquardt desarrollado para problemas de mínimos cuadrados no lineales (Marquardt, 1963; Dennis y Schnabel, 1983).

Programa de cómputo utilizado. Para llevar a cabo la identificación de parámetros se recurrió al programa MIMO (Li y Mau, 1990), el cual es un programa de cómputo especializado para la identificación de sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas utilizando registros sísmicos de edificios. Este programa tiene tres módulos interconectados entre sí con el programa principal. El primer módulo (PREMIMO) realiza un análisis preliminar de los registros sísmicos del edificio; el segundo módulo (MAINMIMO) hace la identificación de los parámetros estructurales usando múltiples entradas y múltiples salidas; y el tercer módulo (POSTMIMO) calcula varias respuestas del edificio: primero realiza una interpolación modal con las formas modales identificadas para obtener los valores correspondientes de cada nivel no instrumentado del edificio, luego calcula las aceleraciones, desplazamientos y momentos de torsión y de volteo de todos los niveles, y finalmente calcula los cortantes de entrepiso y sus respectivas distorsiones.

3.3 Índice de error

Para evaluar la eficiencia de las metodologías utilizadas para la identificación de los parámetros estructurales, se aplicaron los siguientes índices de error que evalúan qué tan bien está hecho el ajuste de las respuestas calculadas por el modelo matemático con respecto a las medidas por el sistema real, cuando ambos son sometidos a la misma excitación.

El error relativo de cada respuesta identificada es:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^{np} [a_{oi}(s \Delta t) - a_i(s \Delta t)]^2}{\sum_{s=1}^{np} [a_{oi}(s \Delta t)]^2}}$$

El error total relativo de todo el proceso de identificación es:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nr} \sum_{s=1}^{np} [a_{oi}(s \Delta t) - a_i(s \Delta t)]^2}{\sum_{i=1}^{nr} \sum_{s=1}^{np} [a_{oi}(s \Delta t)]^2}}$$

donde:

- $a_{oi}(t)$ respuesta de aceleración relativa medida en el sistema estructural
- $a_i(t)$ respuesta de aceleración relativa calculada con el modelo matemático
- np número de puntos en los registros de respuesta
- nr número de registros de respuesta

3.4 Modelos considerados

Los sistemas estructurales se pueden representar con modelos simplificados de uno o varios grados de libertad, considerando efectos de torsión y de interacción suelo-estructura si es necesario. Antes de realizar la estimación de parámetros del edificio Jal con registros sísmicos, se realizaron varias simulaciones matemáticas con los diferentes modelos para evaluar la eficiencia de las metodologías propuestas.

En las simulaciones no se consideró la presencia de ruido en las señales; por lo tanto, el problema de identificación se consideró determinista.

Para el planteamiento de estado se consideraron los siguientes modelos:

- 1. Modelo de un grado de libertad (M1GL). En donde se evalúan los parámetros de rigidez y amortiguamiento para la superestructura y para el sistema suelo-estructura (fig 3.1).**
- 2. Modelo de tres grados de libertad plano (M3GL-2D). Este modelo tiene un grado de libertad asociado a la estructura y dos grados asociados a los efectos de interacción suelo-estructura, uno para el movimiento de traslación de la base y otro para el cabeceo de la cimentación (fig 3.2).**
- 3. Modelo de cinco grados de libertad plano (M5GL-2D). Se asume una estructura de cortante de tres niveles (un grado de libertad por nivel) y dos grados relacionados con el efecto de interacción suelo-estructura, uno para el movimiento de traslación de la base y otro para el cabeceo de la cimentación (fig 3.3).**
- 4. Modelo de tres grados de libertad tridimensional (M3GL-3D). Este modelo toma en cuenta el comportamiento tridimensional del sistema, es decir, los tres grados de libertad están asociados a las traslaciones del sistema en dos direcciones ortogonales y a la torsión debida a la excentricidad entre los centros de masa y rigidez (fig 3.4).**
- 5. Modelo de siete grados de libertad tridimensional (M7GL). Este modelo tiene tres grados de libertad asociados a la estructura y cuatro grados asociados a los efectos de interacción suelo-estructura. Los grados de libertad de la estructura corresponden a las traslaciones en dos direcciones ortogonales y a la rotación de la misma en su plano, y los grados de libertad de la interacción suelo-estructura corresponden a las traslaciones en dos direcciones ortogonales y a sus respectivas rotaciones de cabeceo. Este modelo tiene las siguientes hipótesis: considera diafragma rígido de piso en azotea y base, se concentra la**

masa de la superestructura en la azotea y la de la cimentación en la base y se desprecian los grados de libertad de la base, de rotación en su plano y de traslación vertical (fig 3.5).

El desarrollo del planteamiento de estado de las ecuaciones de equilibrio para los modelos matemáticos se presenta en el apéndice A.

Para el planteamiento modal se consideraron los siguientes modelos:

- I. **Modelo 1N1GT.** Tiene un grado de libertad asociado a la traslación de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas el registro de respuesta de traslación en la azotea y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.6).

Modelo 1N2GAT. Tiene dos grados de libertad asociados a la traslación y a la torsión de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en la azotea, y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.6).

- II. **Modelo 1N1GS1.** Tiene un grado de libertad asociado a la traslación de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas el registro de respuesta de traslación en la azotea y como entrada el registro de traslación del sótano (fig 3.7).

Modelo 1N2GAS1. Tiene dos grados de libertad asociados a la traslación y a la torsión de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en la azotea, y como entrada el registro de traslación del sótano (fig 3.7).

- III. **Modelo 1N1GS2.** Tiene un grado de libertad asociado a la traslación de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas el registro de respuesta de traslación en la azotea y como entrada los registros de traslación y cabeceo de la base (fig 3.8).

Modelo 1N2GAS2. Tiene dos grados de libertad asociados a la traslación y a la torsión de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en la azotea, y como entrada los registros de traslación y cabeceo de la base (fig 3.8).

- IV. Modelo 1N3GT.** Tiene tres grados de libertad, uno asociado a la traslación de la estructura y los otros dos asociados a la traslación y cabeceo de la base. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación en la azotea y traslación y cabeceo de la base, y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.9).

Modelo 1N4GAT. Tiene cuatro grados de libertad, dos asociados a la traslación y a la torsión de la estructura y los otros dos asociados a la traslación y cabeceo de la base. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en la azotea, y traslación y cabeceo de la base, y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.9).

- V. Modelo 3N5GT.** Tiene cinco grados de libertad, tres asociados a las traslaciones de tres niveles de la estructura y los otros dos asociados a la traslación y cabeceo de la base. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación en tres niveles de la estructura, y traslación y cabeceo de la base, y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.10).

Modelo 3N8GAT. Tiene ocho grados de libertad, tres asociados a las traslaciones y tres asociados a las torsiones de tres niveles de la estructura, y los otros dos asociados a la traslación y cabeceo de la base. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en tres niveles de la estructura, y traslación y cabeceo de la base, y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.10).

- VI. Modelo 3N3GT.** Tiene tres grados de libertad asociados a las traslaciones de tres niveles de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación en tres niveles de la estructura, y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.11).

Modelo 3N6GAT. Tiene seis grados de libertad asociados a las traslaciones y a las torsiones de tres niveles de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en tres niveles de la estructura, y como entrada el registro de traslación del terreno (fig 3.11).

- VII. Modelo 3N3GS1.** Tiene tres grados de libertad asociados a las traslaciones de tres niveles de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación en tres niveles de la estructura, y como entrada el registro de traslación del sótano (fig 3.12).

Modelo 3N6GAS1. Tiene seis grados de libertad asociados a las traslaciones y a las torsiones de tres niveles de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en tres niveles de la estructura, y como entrada el registro de traslación del sótano (fig 3.12).

- VIII. Modelo 3N3GS2.** Tiene tres grados de libertad asociados a las traslaciones de tres niveles de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación en tres niveles de la estructura, y como entrada los registros de traslación y cabeceo del sótano (fig 3.13).

Modelo 3N6GAS2. Tiene seis grados de libertad asociados a las traslaciones y a las torsiones de tres niveles de la estructura. Este modelo utiliza para la identificación de sistemas los registros de respuesta de traslación y torsión en tres niveles de la estructura, y como entrada los registros de traslación y cabeceo del sótano (fig 3.13).

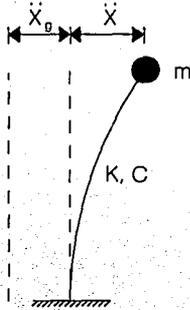


Fig 3.1 Modelo de un grado de libertad (M1GL)

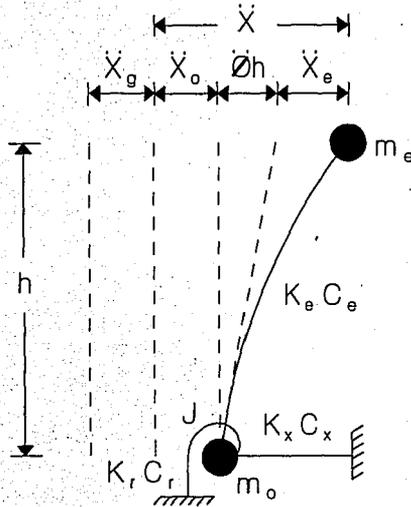


Fig 3.2 Modelo de tres grados de libertad plano (M3GL-2D)

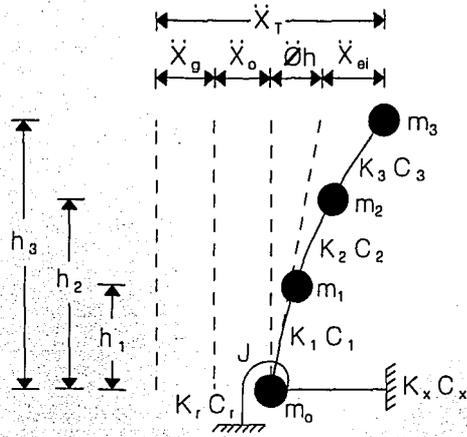


Fig 3.3 Modelo de cinco grados de libertad plano (M5GL-2D)

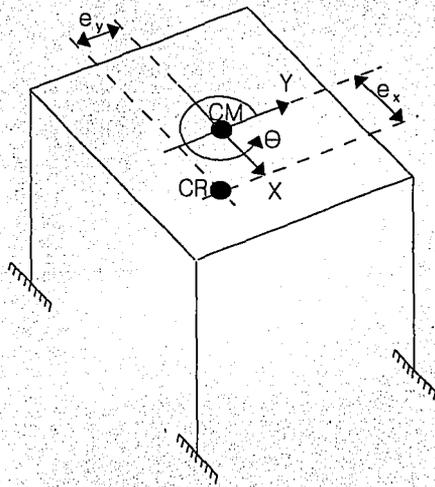


Fig 3.4 Modelo de tres grados de libertad tridimensional (M3GL-3D)

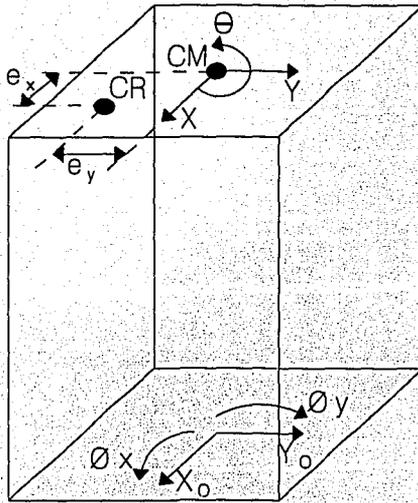


Fig 3.5 Modelo de siete grados de libertad tridimensional (M7GL)

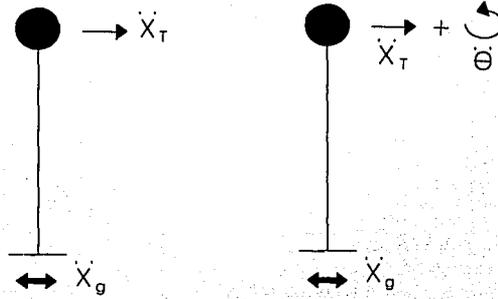


Fig 3.6 Modelos 1N1GT y 1N2GAT

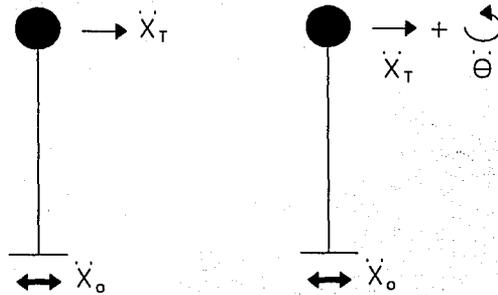


Fig 3.7 Modelos 1N1GS1 y 1N2GAS1

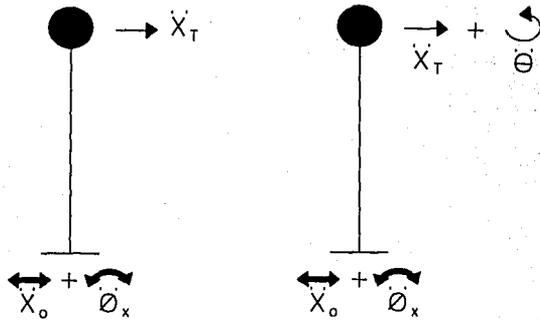


Fig 3.8 Modelos 1N1GS2 y 1N2GAS2

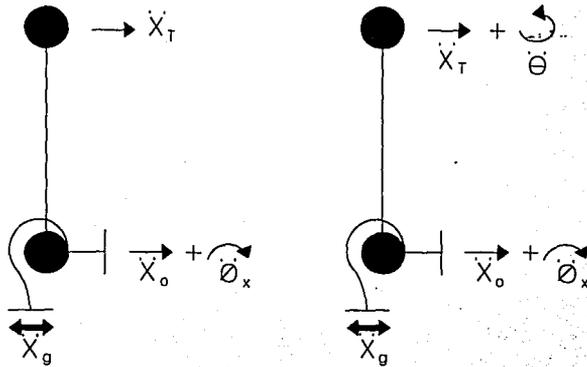


Fig 3.9 Modelos 1N3GAT y 1N4GAT

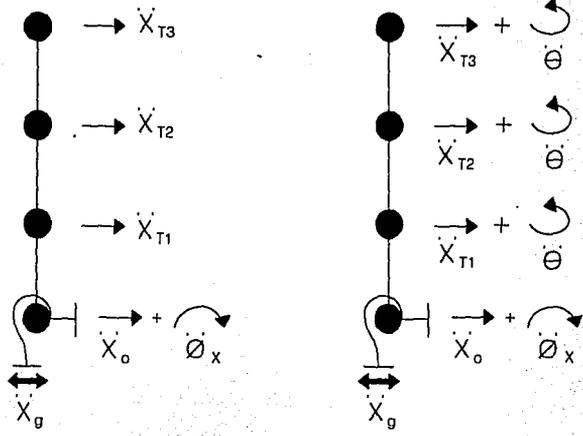


Fig 3.10 Modelos 3N5GT y 3N8GAT

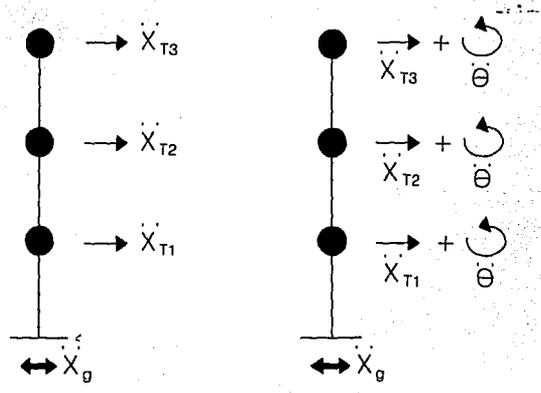


Fig 3.11 Modelos 3N3GT y 3N6GAT

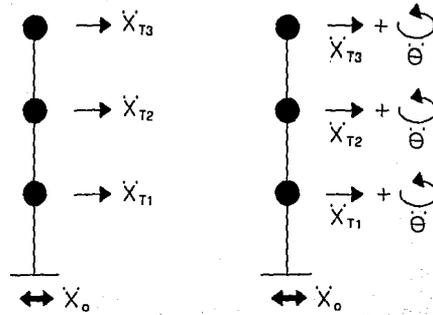


Fig 3.12 Modelos 3N3GS1 y 3N6GAS1

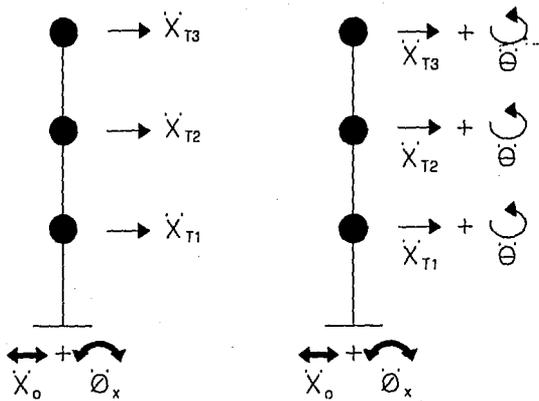


Fig 3.13 Modelos 3N3GS2 y 3N6GAS2

4. SIMULACIONES

Las simulaciones de sistemas estructurales permiten evaluar el comportamiento de los modelos matemáticos y los métodos de identificación de sistemas. En las simulaciones se conoce con anterioridad las características dinámicas del sistema estructural. Por lo tanto, se puede calcular la eficiencia que tienen los modelos al tratar de ajustar las respuestas del sistema real. Esta fase inicial de simulaciones es básica para conocer detalladamente los modelos matemáticos con el fin de enfrentar de manera racional las posibles situaciones que se presenten durante el análisis paramétrico utilizando registros experimentales de sistemas estructurales instrumentados.

Los modelos matemáticos se construyen a partir del equilibrio dinámico, cinemática de las deformaciones y características constitutivas de los materiales. Estos modelos pueden procesarse con diferentes herramientas numéricas como son el método de las rigideces, el método de elementos finitos, etc. Las técnicas de estimación de parámetros, con base en datos experimentales, pueden ajustar los parámetros del modelo para que éste represente el comportamiento de una estructura durante un evento sísmico específico. El problema de la estimación de parámetros se formula como uno de minimización de la diferencia entre las respuestas medidas en el sistema real y las estimadas a partir del modelo matemático.

4.1 Características de los registros

Las características principales de los registros de aceleración, necesarios para excitar los modelos matemáticos, que se deben tener en cuenta antes de hacer un análisis de identificación de sistemas son básicamente el contenido frecuencial presente en la señal y el diezmado.

El contenido frecuencial de las señales es básico al realizar la identificación de las características estructurales de un sistema, ya que de esto depende que se exciten las frecuencias necesarias que se requieren identificar de la estructura. Para determinar el contenido frecuencial de un registro es necesario calcular su espectro de Fourier.

El diezmado es una práctica común que se hace con los registros experimentales antes de realizar análisis de identificación de sistemas, debido a las restricciones de las computadoras para manejar gran cantidad de datos y con el fin de ganar velocidad durante el procesamiento de la información. Sin embargo, a veces no se tiene en cuenta los problemas que esto puede acarrear en cuanto a la distorsión en la información, tanto en frecuencia como en amplitud. El diezmado depende del contenido frecuencial necesario de las señales para poder excitar todos los grados de libertad del modelo matemático, es decir, se debe tener presente cual es el período mínimo del sistema estructural a identificar en el análisis paramétrico (T_{\min}), y se recomienda que el incremento máximo de tiempo (Δt) que se puede utilizar, para que el análisis sea estable, es del orden de $T_{\min}/10$. En el apéndice B se presentan algunos resultados del análisis de la influencia del diezmado de las señales en cuanto a la convergencia del M7GL. Se concluye que al utilizar incrementos de tiempo pequeños, la señal tiene una mejor resolución y esto ayuda a la convergencia del modelo; sin embargo, al aumentar el incremento de tiempo se presentan problemas de convergencia en la identificación de los parámetros estructurales del sistema.

Antes de realizar el diezmado de los registros de aceleración, éstos se deben filtrar con un filtro pasa bajas para evitar problemas de *aliasing*. Este fenómeno se puede explicar de la siguiente forma: los registros que originalmente estaban con un intervalo de tiempo (Δt), al realizar el diezmado, este intervalo de tiempo se incrementará a ($d \Delta t$), donde d es el factor de diezmado. Por consiguiente, los registros que inicialmente podrían ser representados en series de Fourier hasta un componente frecuencial máximo (frecuencia de *Nyquist*) de $f_n = 1/(2 \Delta t)$, después de realizar el diezmado, la frecuencia de *Nyquist* disminuirá a $f'_n = 1/(2 d \Delta t)$, y toda la información arriba de esta frecuencia se adicionará en el intervalo frecuencial entre 0 y f'_n , distorsionando las señales diezmadas. Para evitar este inconveniente, los registros originales se deben filtrar antes de diezmarse, para remover la información arriba de f'_n . Por ejemplo, cuando se tienen registros con un intervalo de tiempo $\Delta t = 0.01s$, su frecuencia de *Nyquist* es de $f_n = 50$ Hz. Si se desean diezmarse con un factor $d = 5$, su nueva frecuencia de *Nyquist* es de $f'_n = 10$ Hz. Por lo tanto, se deben eliminar los componentes frecuenciales arriba de 10 Hz con un filtro pasa bajas, antes de diezmarse. Además, dado que ningún filtro tiene un corte de componentes frecuenciales perfecto, se acostumbra filtrar la señal a una frecuencia

alrededor del 70% de la frecuencia de *Nyquist* para eliminar en lo posible los componentes frecuenciales no deseables de la señal (Bendat y Pierson, 1986).

4.2 Análisis no paramétrico simplificado

Antes de realizar la identificación de sistemas paramétrica se aplicó la identificación de sistemas no paramétrica simplificada con los registros de aceleración del sistema estructural. Esta técnica consiste en calcular los espectros de Fourier y varios cocientes espectrales con los registros, y así obtener las características dinámicas asociadas a la traslación de la superestructura y al sistema suelo-estructura para cada dirección, la de torsión del sistema y las asociadas a la traslación y cabeceo de la base para cada dirección.

El sistema estructural se idealiza según se ilustra en la fig 4.1, donde se han incorporado dos grados de libertad asociados a la traslación horizontal y al cabeceo de la base de la estructura.

Para obtener las frecuencias y las fracciones de amortiguamiento crítico de traslación de la superestructura y del sistema suelo-estructura se realizan los siguientes cocientes espectrales (Paolucci, 1993): para el sistema se calcula el cociente entre el espectro de la aceleración total en azotea y el de la aceleración del terreno para cada dirección (X_T/X_g y Y_T/Y_g); y para la superestructura se calcula el cociente entre el espectro de la aceleración total en azotea y el de la aceleración total en azotea restándole la contribución de la estructura ($X_T/(X_T-X_e)$ y $Y_T/(Y_T-Y_e)$).

Para obtener las características dinámicas de torsión del sistema, se efectúan los siguientes cocientes espectrales: para obtener la frecuencia, se calcula la función de transferencia entre un extremo y el centro de la azotea, y para obtener la fracción de amortiguamiento crítico, se calcula la función de transferencia entre azotea y sótano.

Finalmente, para obtener las características dinámicas asociadas al efecto de interacción suelo-estructura, se calculan los siguientes cocientes espectrales (Paolucci, 1993): el espectro de la aceleración traslacional de la base entre el de la aceleración

del terreno, para cada dirección (X_o/X_g y Y_o/Y_g); y el espectro de la aceleración correspondiente a la contribución del cabeceo en la respuesta total en azotea entre el de la aceleración correspondiente a la contribución de la estructura en la respuesta total en azotea para cada dirección ($(\phi_x h)/X_o$ y $(\phi_y h)/Y_o$).

4.3 Estrategias de estimación paramétrica

Para las simulaciones se siguió el procedimiento siguiente:

- Se propusieron valores iniciales a los parámetros que gobiernan el comportamiento dinámico del sistema estructural (parámetros de rigidez, amortiguamiento y masa)
- Se calcularon las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración para cada uno de los grados de libertad del modelo, mediante un análisis paso a paso con el algoritmo β de Newmark
- Con la señal de excitación y con las respuestas simuladas por el modelo, se identificaron los parámetros mediante el uso de los dos métodos de identificación de sistemas señalados.

Se utilizaron diferentes estrategias para utilizar los métodos propuestos de identificación de sistemas con el fin de aprovechar al máximo las ventajas de cada uno de ellos; además, algunos modelos matemáticos son similares para los dos métodos, y sus resultados se comparan con base en el índice de error explicado en el subcapítulo 3.3.

Antes de aplicar las estrategias para la identificación de sistemas paramétrica, conviene hacer un análisis no paramétrico simplificado (espectros de Fourier, cocientes espectrales, etc.) con los registros experimentales para conocer las características dinámicas del sistema estructural a evaluar y estimar valores iniciales de los parámetros a identificar.

La estrategia que se siguió para realizar el análisis paramétrico utilizando el planteamiento de estado es la siguiente:

- 1. Evaluar el M1GL para cada dirección ortogonal e identificar los parámetros de rigidez y amortiguamiento para los componentes de traslación del sistema estructural. Como valores iniciales se proponen los calculados del análisis no paramétrico.**
- 2. Evaluar el M3GL-2D para cada dirección ortogonal e identificar los parámetros de traslación de la superestructura, y de traslación y cabeceo de la base. Como valores iniciales se proponen los parámetros de traslación de la superestructura identificados con el M1GL, y para los parámetros asociados al efecto de interacción suelo-estructura, se proponen los calculados del análisis no paramétrico.**
- 3. Evaluar el M3GL-3D para identificar los parámetros del sistema estructural. Se le dan como valores iniciales los identificados con el M1GL y con el análisis no paramétrico.**
- 4. Finalmente, evaluar el M7GL para identificar tanto los parámetros de la superestructura como los de interacción suelo-estructura. Se le dan como valores iniciales los identificados con los modelos M3GL-2D y M3GL-3D.**
- 5. Además, se analizó otro sistema estructural aplicando el M5GL-2D para identificar sus parámetros y características dinámicas correspondientes a modos superiores.**

La estrategia que se siguió para realizar el análisis paramétrico utilizando el planteamiento modal es la siguiente:

- I. Evaluar los modelos I, II y III considerados en el subcapítulo 3.4 para cada dirección ortogonal e identificar los parámetros modales de traslación y torsión del sistema estructural. Como valores iniciales se proponen los calculados del análisis no paramétrico simplificado.**

- II. **Evaluar los modelos IV considerados en el subcapítulo 3.4 para cada dirección ortogonal e identificar los parámetros modales de traslación y torsión del sistema estructural. Como valores iniciales se le proponen los parámetros modales identificados con los modelos anteriores y con el análisis no paramétrico simplificado.**
- III. **Analizar otro sistema estructural y evaluar los modelos V, VI, VII y VIII considerados en el subcapítulo 3.4 para identificar parámetros correspondientes a modos superiores. Como valores iniciales se proponen los identificados del análisis no paramétrico simplificado.**

Los modelos desarrollados para realizar análisis paramétricos utilizando las dos estrategias propuestas tienen pocos problemas de convergencia. Sin embargo, el M7GL utilizado con el planteamiento de estado es el modelo más complejo de todos los desarrollados, por lo que se le dio una mayor importancia en las simulaciones realizadas y se evaluó detalladamente su eficiencia para la identificación paramétrica. En el apéndice B se presenta un resumen de la evaluación de este modelo de siete grados de libertad tridimensional con efectos de interacción suelo-estructura.

4.4 Simulación con ruido blanco

Lo primero que se hace es proponer los parámetros necesarios que describan el sistema estructural que se va a analizar (tablas 4.1 y 4.2). Además, en la tabla 4.3 se presentan las frecuencias fundamentales de cada componente del sistema, y se asumieron amortiguamientos de 5% para los componentes de traslación de la estructura en cada dirección ortogonal y de 3% para la componente torsional, y para los efectos de interacción suelo-estructura, de 10 % para los componentes de traslación y cabeceo en cada dirección del sistema estructural.

Se generó un ruido blanco gaussiano para excitar los modelos matemáticos a utilizar en la identificación de sistemas, con el fin de obtener una señal con buena amplitud para todo el contenido frecuencial (fig 4.2). A estas señales se le eliminaron los componentes frecuenciales arriba de 30 Hz con un filtro pasa bajas, dado que estos

componentes no eran necesarios para el análisis paramétrico del sistema estructural. La simulación se hizo mediante un programa de análisis paso a paso utilizando el algoritmo β de Newmark (Murià-Vila et al., 1993). Se simularon todas las respuestas para cada grado de libertad del M7GL y la identificación se realizó utilizando los modelos matemáticos desarrollados y los dos planteamientos de identificación de sistemas propuestos.

Esta etapa se hizo así para tratar de simular lo que se hace en la práctica con registros sísmicos experimentales captados de edificios instrumentados, es decir, a partir de respuestas experimentales de un sistema estructural de múltiples grados de libertad, se trata de ajustar dichas respuestas utilizando modelos simplificados con diferentes estrategias de estimación paramétrica e identificar sus características dinámicas. En las figs 4.3a y 4.3b se aprecian las aceleraciones simuladas para cada grado de libertad del M7GL con sus respectivos espectros de Fourier, asociadas a la superestructura y al efecto de interacción suelo-estructura, respectivamente.

Inicialmente se hizo un análisis no paramétrico con las respuestas simuladas por el M7GL para identificar las características dinámicas del sistema estructural y así poder proponer valores iniciales cercanos a los reales al realizar el análisis paramétrico aplicando los dos planteamientos de identificación de sistemas propuestos. Se calcularon los espectros de Fourier y varios cocientes espectrales para obtener las características dinámicas del sistema estructural para cada dirección ortogonal (fig 4.4). Con este análisis se obtienen valores cercanos de las frecuencias fundamentales con respecto a los valores propuestos para los componentes traslacionales en las dos direcciones ortogonales, encontrando diferencias máximas de 5% con respecto a los valores reales. Sin embargo, los componentes de traslación y cabeceo de la base no se pueden estimar adecuadamente con dichos cocientes espectrales (fig 4.4). Para la estimación de las fracciones de amortiguamiento crítico con el análisis no paramétrico se recurrió al método del factor de amplificación dinámico, el cual a veces sobrestima los amortiguamientos del sistema a causa de la pobre resolución en frecuencia y amplitud que tienen los registros de respuesta, y también debido a que el factor de suavizado disminuye las ordenadas máximas de los espectros de Fourier; si el factor de suavizado es cero, el factor de amplificación dinámico aumenta y por consiguiente, las fracciones de amortiguamiento crítico disminuyen, acercándose un poco más a las

propuestas.

Además de los métodos no paramétricos, también se utilizan diversas formulaciones para calcular las características dinámicas del sistema suelo-estructura, las cuales ayudan a tener una idea cercana de los valores reales con el fin de proponerlas como valores iniciales para la estimación paramétrica. Se han aplicado diversas expresiones para calcular las fracciones de amortiguamiento crítico equivalente de sistemas estructurales y se han obtenido valores cercanos a los medidos experimentalmente (Muria-Vila et al., 1994).

Luego de haber aplicado las dos estrategias de estimación paramétrica propuestas, se obtuvieron los siguientes resultados:

Con las respuestas simuladas por el M7GL se alimentó el M1GL para identificar las características dinámicas del sistema estructural utilizando los dos planteamientos propuestos. Para obtener los parámetros del sistema suelo-estructura (fig 4.1) se le debe dar como entrada al M1GL la respuesta de traslación de la azotea relativa a la base $(\ddot{x}_o + \ddot{x}_o + \phi \ddot{h})$, y como excitación la aceleración del terreno (\ddot{x}_g) , y para obtener los parámetros de la superestructura se le debe dar solamente al M1GL la contribución de la superestructura en la respuesta total (\ddot{x}_o) , y como excitación la aceleración relativa a nivel de la base $(\ddot{x}_g + \ddot{x}_o + \phi \ddot{h})$.

Utilizando el planteamiento de estado con el M1GL se obtienen los parámetros de traslación y sus respectivas características dinámicas del sistema estructural (tabla 4.4), las frecuencias de traslación las identifica bien, con una diferencia máxima de 2% con respecto a las propuestas; y con los modelos 1N1GT, 1N1GS1 y 1N1GS2 utilizando el planteamiento modal también se obtienen valores cercanos a los reales (tabla 4.5), además, los errores relativos de las respuestas identificadas son menores que los obtenidos utilizando el planteamiento de estado. El modelo que mejor comportamiento tiene con el planteamiento modal es el 1N1GS2, debido a que presenta menores errores de estimación en la identificación que los otros dos modelos. A pesar de los errores relativos obtenidos de la identificación, se logra una correlación aceptable entre las respuestas simuladas con el M7GL y las identificadas por el M1GL utilizando ambos planteamientos de identificación de sistemas (fig 4.5).

Es importante resaltar que los errores relativos de las respuestas identificadas no son nulos a pesar de utilizar registros simulados libres de ruido, esto se debe a que las señales fueron simuladas con el M7GL y no con el M1GL. En adición, inicialmente se hicieron simulaciones con el M1GL y posteriormente se identificaron sus respuestas utilizando ambos planteamientos y efectivamente los errores relativos si son nulos.

Se utilizó el M3GL-2D con las respuestas simuladas por el M7GL y se trató de reproducir las respuestas asociadas a la traslación de la superestructura, y a la traslación y cabeceo de la base para cada dirección ortogonal. Utilizando el planteamiento de estado con este modelo se identificaron satisfactoriamente todos los parámetros del sistema estructural para cada dirección ortogonal (tabla 4.6); las frecuencias de traslación del sistema las identificó con diferencias máximas de un 5% con respecto a los valores propuestos, y las características dinámicas asociadas al efecto de interacción suelo-estructura tuvo diferencias máximas con respecto a los valores propuestos de un 8% en frecuencias y de un 1% en amortiguamientos. Se aplicaron los modelos 1N3GT y 1N4GAT con el planteamiento modal, y se identificaron bien las características dinámicas de traslación de la superestructura; sin embargo, para los componentes de traslación y cabeceo de la base, se presentan diferencias hasta de 10 y 30% con respecto a los valores reales, respectivamente (tabla 4.7).

Para identificar los parámetros estructurales teniendo en cuenta el comportamiento tridimensional del sistema, se evaluó el M3GL-3D utilizando el planteamiento de estado; este modelo identificó muy bien las características dinámicas del sistema simulado (tabla 4.8). Con el planteamiento modal se aplicaron los modelos 1N2GAT, 1N2GAS1 Y 1N2GAS2 en cada dirección ortogonal y también se identificaron adecuadamente las características dinámicas del sistema (tabla 4.9). Si se comparan los errores relativos de cada señal identificada, se puede concluir que el M3GL-3D utilizando el planteamiento de estado tuvo un mejor comportamiento que los modelos utilizando el planteamiento modal. Este M3GL-3D es un modelo muy eficiente y representa adecuadamente el comportamiento global de un sistema estructural (González et al., 1994). En la fig 4.6 se puede observar que las respuestas identificadas con el planteamiento de estado se acercan más a las simuladas que con el planteamiento modal.

Finalmente, utilizando el planteamiento de estado se evaluó el M7GL con las respuestas simuladas, proporcionando como valores iniciales los identificados con los modelos M3GL-2D y M3GL-3D. Este modelo identifica los parámetros estructurales como se aprecia en la tabla 4.10, con diferencias máximas de 17% en los parámetros asociados a las superestructura y de 2% en los parámetros asociados al efecto de interacción suelo-estructura; las características dinámicas también las identifica como se aprecia en la tabla 4.11, presentándose diferencias máximas de 5% y 20% para las frecuencias del sistema y los amortiguamientos de la estructura, respectivamente. En este caso, a pesar de que la simulación se generó con el mismo modelo no se logran errores relativos nulos, lo cual advierte de problemas de convergencia.

Para ver la eficiencia de los planteamientos propuestos cuando tratan de identificar frecuencias correspondientes a modos superiores, se analizó otro sistema estructural, cuyos datos y frecuencias se aprecian en las tablas 4.11 y 4.13, respectivamente. Además, se asumieron amortiguamientos para la superestructura de 0.4, 1.0 y 1.0% para los tres primeros modos de vibrar del sistema.

Al aplicar el M5GL-2D con el planteamiento de estado se logra identificar adecuadamente la frecuencia fundamental del sistema; sin embargo, este modelo no es adecuado para identificar las frecuencias de los modos superiores del sistema estructural (tabla 4.14). La correlación entre las respuestas identificadas y las reales es aceptable (fig 4.7), debido a que el primer modo tiene una participación alta en la respuesta total del sistema.

Por otro lado, se aplicaron los modelos 3N5GT, 3N3GT, 3N3GS1 Y 3N3GS2 con el planteamiento modal y contrariamente a lo anterior, se lograron identificar adecuadamente las frecuencias correspondientes a los modos superiores (tabla 4.15). El modelo que mejor comportamiento tiene es el 3N3GS2, debido a que presenta menores errores, tanto en las respuestas del nivel 3 (N3), nivel 2 (N2), nivel 1 (N1) y sótano (SOT), como en la respuesta total de todo el proceso de identificación (TOT). Además, la correlación entre las respuestas identificadas con respecto a las reales es muy buena (fig 4.7).

4.5 Simulación con registros sísmicos del edificio Jal

Los parámetros propuestos y sus respectivas características dinámicas para esta simulación son los mismos que los utilizados para la simulación anterior; el único cambio que se hace es el tipo de registros de excitación utilizados para simular las respuestas que se van a usar para la identificación paramétrica. La idea de esta simulación es observar la influencia que tiene el contenido frecuencial de la excitación para la identificación de sistemas.

Los registros de excitación utilizados para esta simulación corresponden al tramo inicial de un sismo registrado cerca del edificio Jal, por lo que presenta un reducido intervalo de componentes frecuenciales, como se puede apreciar en los espectros de Fourier de las señales de excitación (fig 4.8). Estos tienen una frecuencia dominante de 0.5 Hz, la cual es la frecuencia propia del suelo.

Nuevamente se calculan las respuestas del sistema estructural de cada grado de libertad del M7GL (figs 4.9a y 4.9b).

Se hizo el análisis no paramétrico y se calcularon los espectros de Fourier y varios cocientes espectrales con las señales simuladas por el M7GL (fig 4.10), y se lograron identificar bien las características de traslación del sistema pero no las del efecto de interacción suelo-estructura.

Aplicando nuevamente los planteamientos de estado y modal para hacer los análisis paramétricos, se obtuvieron los siguientes resultados:

Se aplicó el planteamiento de estado con el M1GL y éste identificó adecuadamente los parámetros y sus características dinámicas para cada dirección del sistema estructural (tabla 4.16). La diferencia máxima en cuanto a las frecuencias identificadas del sistema con respecto a las propuestas es del 5%; también utilizando el planteamiento modal con el modelo que mejor comportamiento presentó en la simulación con ruido blanco (modelo 1N1GS2), se identificaron bien las características dinámicas del sistema (tabla 4.17). Sin embargo, con este último planteamiento se obtienen errores relativos menores que con el planteamiento de estado. El error

relativo es mayor para la dirección Y que para la X con ambos planteamientos, y este mayor error se refleja en la fig 4.11, donde el ajuste para la dirección X es muy bueno, y el ajuste para la dirección Y es regular, presentando errores de 48% y 25% para el planteamiento de estado y modal respectivamente. Aquí cabe resaltar que aunque el error relativo máximo en la dirección X es de 17%, ambos planteamientos identifican adecuadamente las características dinámicas del sistema y presentan un buen ajuste con las respuestas simuladas; además, también es importante resaltar que utilizando la señal de excitación experimental del edificio Jal se presentan errores relativos mayores que cuando se utiliza la excitación de ruido blanco, debido al reducido intervalo de componentes frecuenciales que tiene la señal de entrada.

Nuevamente, los errores del proceso de identificación no son nulos, a pesar de utilizar registros libres de ruido, debido a que las señales fueron simuladas con un modelo diferente al utilizado para la identificación. Cuando se simulan las respuestas y se identifican los parámetros estructurales con el mismo modelo, siempre producirán errores relativo nulos.

El planteamiento de estado con el M3GL-2D identifica en forma adecuada los parámetros estructurales y sus respectivas características dinámicas (tabla 4.18), cuando los valores iniciales de los parámetros se le proponen cercanos a los valores reales de la simulación (menores de un 15% en frecuencias y de un 25% en amortiguamientos, aproximadamente), pero si por el contrario los valores iniciales se alejan mucho de los reales, este M3GL-2D tiene problemas de convergencia, principalmente con respecto a los parámetros asociados al efecto de interacción suelo-estructura; por lo tanto, este modelo se debe utilizar cuando la señal tenga un contenido frecuencial tal que excite todos los grados de libertad del modelo, de lo contrario, posiblemente se presentarán problemas de convergencia durante el análisis paramétrico.

Utilizando el planteamiento de estado con el M3GL-3D se identifican muy bien los parámetros y las características dinámicas del sistema estructural (tabla 4.19), y utilizando el planteamiento modal con el modelo 1N2GAS2 también identifica bien las características dinámicas del sistema (tabla 4.20); sin embargo, los errores relativos de las señales identificadas también son mayores con el planteamiento modal, como

se puede observar en la fig 4.12, donde las respuestas identificadas con el planteamiento de estado se acercan más a las simuladas que con el planteamiento modal.

Finalmente, utilizando el planteamiento de estado con el M7GL se presentaron problemas en cuanto a la convergencia durante el análisis paramétrico, debido al reducido intervalo de componentes frecuenciales que tiene la señal de excitación utilizada, la cual no alcanza a excitar los grados de libertad asociados al efecto de interacción suelo-estructura. En la tabla 4.21 se presenta una comparación de los parámetros identificados con respecto a los reales, donde las máximas diferencias corresponden a los parámetros asociados al efecto de interacción suelo-estructura, con un valor máximo de 22%. Si comparamos esta tabla (tabla 4.21) con la identificada de la simulación con ruido blanco (tabla 4.10) se puede apreciar la gran diferencia en cuanto a los parámetros identificados asociados al efecto de interacción suelo-estructura con respecto a los valores reales. Definitivamente, la señal de excitación es básica en la convergencia del M7GL como se explica detalladamente en el apéndice B.

Por otro lado, el M7GL identificó aceptablemente las frecuencias de vibrar del sistema, con una diferencia máxima de 7% para el componente torsional (tabla 4.22). Los amortiguamientos presentaron mayores diferencias, principalmente en los componentes torsional y de interacción suelo-estructura, pero éstos influyen poco en la convergencia del M7GL (Pérez, 1995).

Analizando el otro sistema estructural (tablas 4.12 y 4.13), se aplicó el M5GL-2D con el planteamiento de estado y se logró identificar bien solamente la frecuencia fundamental del sistema (tabla 4.23). Igual que en la simulación con ruido blanco, la correlación entre las respuestas identificadas y reales es buena (fig 4.13), debido a que la excitación tiene un contenido frecuencial tal que logra excitar la frecuencia fundamental del sistema y además, el modo fundamental tiene un factor de participación alto en la respuesta total. Se realizó otra simulación con una señal de excitación similar a la de esta simulación, alejando su frecuencia dominante de la frecuencia del sistema estructural, y evidentemente las respuestas identificadas no se lograron ajustar con las reales.

De igual forma se aplicó el modelo 3N3GS2 con el planteamiento modal y se lograron identificar todas las frecuencias de los modos superiores; sin embargo, los errores de estimación de la identificación con respecto a la simulación con ruido blanco se incrementan a causa del reducido intervalo de componentes frecuenciales de la excitación (tabla 4.24). Las señales identificadas se correlacionan bien con las reales (fig 4.13).

4.6 Comentarios

El contenido de frecuencias en la señal de excitación es totalmente irrelevante cuando la simulación e identificación se realiza con el mismo modelo matemático. Éste modelo siempre converge e identifica adecuadamente los parámetros estructurales, produciendo errores relativos nulos. El problema se presenta cuando la identificación se hace con modelos diferentes al utilizado para la simulación, o cuando se tiene en cuenta respuestas simuladas con ruido. En este caso, el contenido de frecuencias sí es importante para la identificación, y en la medida en que la relación ruido a señal sea menor, el problema será más identificable.

Cuando se hacen análisis paramétricos con registros sísmicos utilizando el planteamiento de estado con el M7GL se presentan problemas de convergencia, porque el M7GL es muy sensible a los parámetros relacionados con el efecto de interacción suelo-estructura, debido a que los registros asociados a la base generalmente carecen de buena resolución en amplitud con respecto a los registros asociados a la superestructura; además, la relación ruido a señal para los registros de la base es mayor, lo que implica una incertidumbre al evaluar un modelo matemático que no toma en cuenta este factor. Por lo tanto, se recomienda desarrollar nuevos modelos matemáticos incorporando este tipo de incertidumbres.

El error relativo de las señales identificadas obtenido del análisis paramétrico es un parámetro muy sensible; es decir, a pesar de que la identificación sea aceptable y las señales se ajusten satisfactoriamente en el tiempo, no siempre el error será nulo. Éste parámetro es acumulativo en todo el tramo de análisis, y aunque las señales identificadas se ajusten adecuadamente con las simuladas para las máximas

amplitudes, a veces no se ajustan bien para otros segmentos poco significativos del tramo de análisis; y este error para estos segmentos se va acumulando, produciendo errores relativos totales mayores. Por lo tanto es importante resaltar que aunque los errores relativos no sean nulos y puedan causar cierta confusión, esto no debe indicar que la identificación del sistema haya sido incorrecta.

TABLA 4.1 DATOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

$h = 2800 \text{ cm}$
$m_{\theta} = 7.34 \text{ t s}^2 / \text{cm}$
$m_o = 0.92 \text{ t s}^2 / \text{cm}$
$J_t = 7951700 \text{ t s}^2 \text{ cm}$
$J_x = 306700 \text{ t s}^2 \text{ cm}$
$J_y = 690000 \text{ t s}^2 \text{ cm}$

TABLA 4.2 PARÁMETROS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

SUPERESTRUCTURA	INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA
$K_x = 159 \text{ t / cm}$	$K_{ox} = 552.79 \text{ t / cm}$
$e_y = 900 \text{ cm}$	$C_{ox} = 13.51 \text{ t s / cm}$
$C_x = 2.05 \text{ t s / cm}$	$K_{rx} = 907126000 \text{ t cm / rad}$
$K_y = 201.23 \text{ t / cm}$	$C_{rx} = 46775500 \text{ t cm s / rad}$
$e_x = 600 \text{ cm}$	$K_{oy} = 552.79 \text{ t / cm}$
$C_y = 2.31 \text{ t s / cm}$	$C_{oy} = 13.51 \text{ t s / cm}$
$K_t = 313920500 \text{ t cm / rad}$	$K_{ry} = 1666496800 \text{ t cm / rad}$
$C_t = 2997700 \text{ t cm s / rad}$	$C_{ry} = 65183900 \text{ t cm s / rad}$

TABLA 4.3 FRECUENCIAS FUNDAMENTALES DEL SISTEMA SUELO-ESTRUCTURA

COMPONENTE	f(Hz)
TRASLACIONAL - DIR. X	0.41
TRASLACIONAL - DIR. Y	0.53
TORSIONAL	1.14
TRASLACIONAL BASE - DIR. X	4.10
TRASLACIONAL BASE - DIR. Y	4.20
CABECEO BASE - DIR. X	13.51
CABECEO BASE - DIR. Y	11.11

TABLA 4.4 PARÁMETROS, CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL M1GL UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	K(t/cm)	C(t s/cm)	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	50.96	2.93	0.42	7.57	17.27
TRASLACIONAL - DIR. Y	78.62	2.07	0.52	4.31	9.5

TABLA 4.5 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON LOS MODELOS 1N1GT, 1N1GS1 Y 1N1GS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

MODELO	COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
1N1GT	TRASLACIONAL - DIR. X	0.42	7.2	16.9
1N1GS1		0.40	6.3	8.7
1N1GS2		0.41	5.6	3.5
1N1GT	TRASLACIONAL - DIR. Y	0.52	4.3	9.0
1N1GS1		0.53	3.6	8.1
1N1GS2		0.54	6.5	2.8

TABLA 4.6 PARÁMETROS, CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL M3GL-2D UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	K	C	f(Hz)	ζ (%)	ERR (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	123.06	2.19	0.43	3.64	25.41
TRASLACIONAL - DIR. Y	201.23	2.31	0.55	3.01	29.73
TRASLACIONAL BASE - DIR. X	558.99	13.77	4.17	10.13	3.86
TRASLACIONAL BASE - DIR. Y	552.79	13.51	4.17	10.00	5.26
CABECEO BASE - DIR. X	915774950	46545883	12.50	9.90	51.24
CABECEO BASE - DIR. Y	1666496800	65183900	11.11	10.00	40.41

TABLA 4.7 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON LOS MODELOS 1N3GT Y 1N4GAT UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

MODELO	COMPONENTE	f(Hz)	ζ (%)	ERROR	ERROR TOTAL (%)
1N3GT	TRASLACIONAL - X	0.42	7.1	23.8	28.5
	TRASL. BASE - X	4.51	15.2	37.4	
	CABECEO - X	9.69	13.8	40.2	
1N4GAT	TRASLACIONAL - X	0.42	6.9	26.8	30.2
	TORSIONAL	1.15	4.1	29.1	
	TRASL. BASE - X	4.51	15.4	31.3	
	CABECEO - X	8.94	14.7	38.6	
1N3GT	TRASLACIONAL - Y	0.52	4.1	19.1	27.4
	TRASL. BASE - Y	4.58	13.1	33.2	
	CABECEO - Y	12.51	16.8	41.2	
1N4GAT	TRASLACIONAL - Y	0.53	5.8	20.1	31.4
	TORSIONAL	1.12	4.6	25.8	
	TRASL. BASE - Y	4.61	12.8	29.4	
	CABECEO - Y	13.82	14.2	37.1	

TABLA 4.8 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL M3GL-3D UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	0.41	4.87	0.98
TRASLACIONAL - DIR. Y	0.53	4.15	1.04
TORSIONAL	1.14	2.54	6.89

TABLA 4.9 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON LOS MODELOS 1N2GAT, 1N2GAS1 Y 1N2GAS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

MODELO	COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)	ERROR T (%)
1N2GAT	TRASLACIONAL - X	0.41	6.9	16.7	17.4
	TORSIONAL	1.15	2.1	18.4	
1N2GAS1	TRASLACIONAL - X	0.40	3.1	9.7	14.1
	TORSIONAL	1.12	0.1	15.4	
1N2GAS2	TRASLACIONAL - X	0.41	7.8	6.8	11.3
	TORSIONAL	1.14	4.6	13.4	
1N2GAT	TRASLACIONAL - Y	0.52	3.9	9.7	14.6
	TORSIONAL	1.17	0.1	15.2	
1N2GAS1	TRASLACIONAL - Y	0.54	3.6	8.4	13.1
	TORSIONAL	1.12	6.5	14.2	
1N2GAS2	TRASLACIONAL - Y	0.53	3.5	5.1	8.2
	TORSIONAL	1.14	3.5	9.9	

TABLA 4.10 PARÁMETROS IDENTIFICADOS CON EL M7GL UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

PARÁMETRO	REAL	IDENTIFICADO	DIFERENCIA (%)
K_y	159	132.35	16.8
e_v	900	846.71	5.9
C_y	2.05	2.22	8.3
K_x	201.23	201.50	0.1
e_x	600	609.17	1.5
C_x	2.31	2.31	0.0
K_t	313920500	351280080	11.9
C_t	2997700	2515162	16.1
K_{ox}	552.79	559.11	1.1
C_{ox}	13.51	13.74	1.7
K_{rx}	907126000	916122480	1.0
C_{rx}	46775500	46568358	0.4
K_{oy}	552.79	552.58	0.0
C_{oy}	13.51	13.51	0.0
K_{ry}	1666496800	1650096300	1.0
C_{ry}	65183900	65229423	0.1

TABLA 4.11 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS IDENTIFICADAS CON EL M7GL UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	f (Hz) Real	f (Hz) Ident.	Dif. (%)	ξ (%) Real	ξ (%) Ident.	Dif. (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	0.41	0.41	0.0	5	5.57	11.4
TRASLACIONAL - DIR. Y	0.53	0.53	0.0	5	5.00	0.0
TORSIONAL	1.14	1.18	3.5	3	2.38	20.7
TRASLACIONAL BASE - DIR. X	4.10	4.12	0.5	10	10.11	1.1
CABECEO BASE - DIR. X	13.51	12.82	5.1	10	9.91	0.9
TRASLACIONAL BASE - DIR. Y	4.20	4.20	0.0	10	10.00	0.0
CABECEO BASE - DIR. Y	11.11	11.11	0.0	10	10.06	0.6

TABLA 4.12 DATOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

$h_3 = 30 \text{ m}$
$h_2 = 20 \text{ m}$
$h_1 = 10 \text{ m}$
$m_3 = 1.819 \text{ t s}^2 / \text{m}$
$m_2 = 3.334 \text{ t s}^2 / \text{m}$
$m_1 = 2.719 \text{ t s}^2 / \text{m}$
$m_0 = 3.000 \text{ t s}^2 / \text{m}$
$J = 150 \text{ t s}^2 \text{ m}$

TABLA 4.13 FRECUENCIAS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

MODO	f(Hz)
1	0.48
2	2.38
3	4.17
4	4.55
5	7.14

TABLA 4.14 FRECUENCIAS IDENTIFICADAS CON EL M5GL APLICANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

MODO	f(Hz) real	f(Hz) Ident.	Diferencia (%)
1	0.48	0.48	0.0
2	2.38	1.41	40.8
3	4.17	2.38	50.1
4	4.55	4.63	1.8
5	7.14	5.62	21.3

TABLA 4.15 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON LOS MODELOS 3N5GT, 3N3GT, 3N3GS1 Y 3N3GS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

PARÁMETROS	MODELOS			
	3N5GT	3N3GT	3N3GS1	3N3GS2
f_1 (Hz)	0.50	0.48	0.48	0.48
f_2 (Hz)	2.41	2.37	2.37	2.39
f_3 (Hz)	4.22	4.13	4.21	4.19
f_4 (Hz)	4.62	4.61	4.59	4.58
f_5 (Hz)	7.28	7.21	7.10	7.12
ξ_1 (%)	1.13	0.51	0.81	0.61
ξ_2 (%)	0.91	0.55	0.65	0.78
ξ_3 (%)	0.68	0.50	0.73	1.30
ξ_4 (%)	0.87	1.30	1.00	1.22
ξ_5 (%)	1.04	2.44	1.43	0.95
ERROR N3 (%)	12.6	12.6	11.4	9.8
ERROR N2 (%)	14.0	13.1	12.7	10.7
ERROR N1 (%)	13.6	14.8	13.1	12.7
ERROR SOT (%)	34.1	26.8	29.1	23.2
ERROR TOT (%)	17.2	15.4	15.2	10.5

TABLA 4.16 PARÁMETROS, CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL M1GL UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	K(t/cm)	C(t s/cm)	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	51.28	1.72	0.42	4.44	17.61
TRASLACIONAL - DIR. Y	89.35	2.55	0.56	4.99	48.04

TABLA 4.17 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL MODELO 1N1GS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
TRASLACIONAL - X	0.42	5.9	13.8
TRASLACIONAL - Y	0.55	4.1	25.2

TABLA 4.18 PARÁMETROS, CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL M3GL-2D UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	K	C	f(Hz)	ξ (%)	ERR (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	107.80	1.90	0.42	3.37	18.10
TRASLACIONAL - DIR. Y	218.94	2.55	0.56	3.18	49.56
TRASLACIONAL BASE - DIR. X	555.83	14.00	4.17	10.33	30.00
TRASLACIONAL BASE - DIR. Y	552.79	13.51	4.17	10.00	42.44
CABECEO BASE - DIR. X	911924600	47785450	12.50	10.19	34.47
CABECEO BASE - DIR. Y	1666496800	65183900	11.11	10.00	47.74

TABLA 4.19 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL M3GL-3D UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	0.41	4.88	1.01
TRASLACIONAL - DIR. Y	0.53	4.12	1.53
TORSIONAL	1.15	2.43	3.03

TABLA 4.20 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL MODELO 1N2GAS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)	ERROR TOT (%)
TRASLACIONAL - X	0.42	4.8	5.3	13.4
TORSIONAL	1.15	4.7	16.1	
TRASLACIONAL - Y	0.55	2.8	6.4	16.3
TORSIONAL	1.17	5.0	18.4	

TABLA 4.21 PARÁMETROS IDENTIFICADOS CON EL M7GL UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

PARÁMETRO	REAL	IDENTIFICADO	DIFERENCIA (%)
K_x	159	145	8.8
e_y	900	835	7.2
C_x	2.05	2.25	9.8
K_y	201.23	218.42	8.5
e_x	600	627	4.5
C_y	2.31	2.48	7.4
K_z	313920500	373512360	19.0
C_z	2997700	2349852	21.6
K_{gx}	552.79	569.38	3.0
C_{gx}	13.51	16.48	22.0
K_{gz}	907126000	954352620	5.2
C_{gz}	46775500	56824585	21.5
K_{gy}	552.79	567.52	2.7
C_{gy}	13.51	15.24	12.8
K_{yz}	1666496800	1913545500	14.8
C_{yz}	65183900	73812182	13.2

TABLA 4.22 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS IDENTIFICADAS CON EL M7GL UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	f (Hz) Real	f (Hz) Ident.	Dif. (%)	ξ (%) Real	ξ (%) Ident.	Dif. (%)
TRASLACIONAL - DIR. X	0.41	0.42	2.4	5	5.45	9.0
TRASLACIONAL - DIR. Y	0.53	0.55	3.8	5	5.10	2.0
TORSIONAL	1.14	1.22	7.0	3	2.16	28.0
TRASLACIONAL BASE - DIR. X	4.10	4.15	1.2	10	12.01	20.1
CABECEO BASE - DIR. X	13.51	13.33	1.3	10	11.84	18.4
TRASLACIONAL BASE - DIR. Y	4.20	4.29	2.1	10	11.13	11.3
CABECEO BASE - DIR. Y	11.11	11.76	5.9	10	10.57	5.7

TABLA 4.23 FRECUENCIAS IDENTIFICADAS CON EL M5GL APLICANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

MODO	f(Hz) real	f(Hz) Ident.	Diferencia (%)
1.	0.48	0.47	2.1
2	2.38	1.47	38.2
3	4.17	2.54	39.1
4	4.55	3.27	28.1
5	7.14	4.22	40.9

TABLA 4.24 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL MODELOS 3N3GS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

PARÁMETROS	MODELO 3N3GS2
f_1 (Hz)	0.50
f_2 (Hz)	2.45
f_3 (Hz)	4.25
f_4 (Hz)	4.86
f_5 (Hz)	7.78
ξ_1 (%)	0.71
ξ_2 (%)	0.82
ξ_3 (%)	1.41
ξ_4 (%)	1.32
ξ_5 (%)	1.04
ERROR N3 (%)	13.4
ERROR N2 (%)	15.2
ERROR N1 (%)	17.2
ERROR SOT (%)	26.1
ERROR TOT (%)	18.4

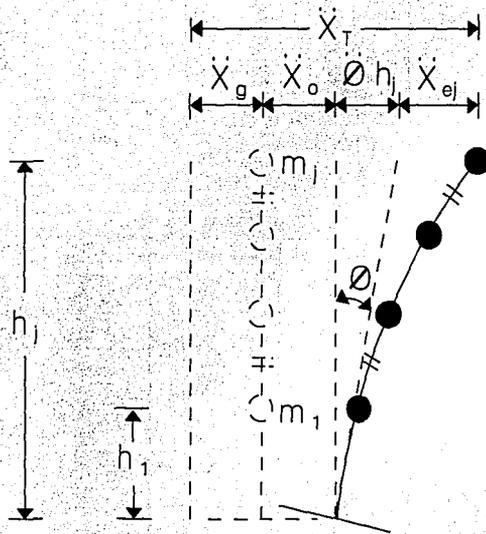


Fig. 4.1 Idealización del sistema estructural

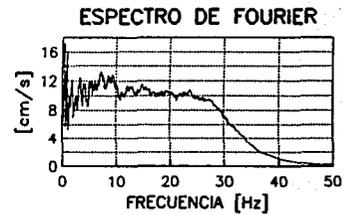
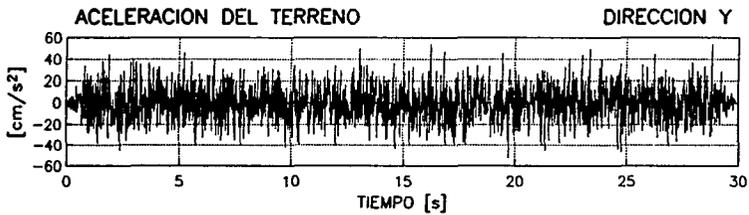
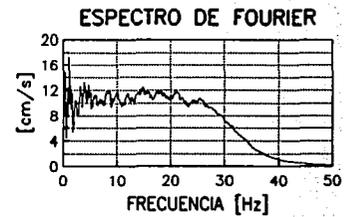
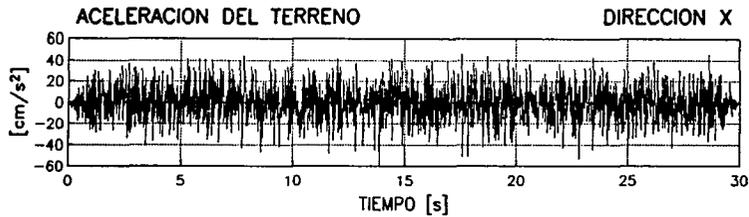


Fig 4.2 Señales de excitación - Ruido blanco

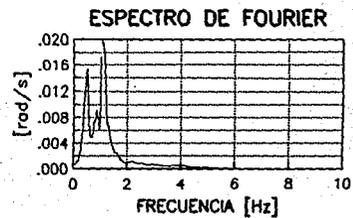
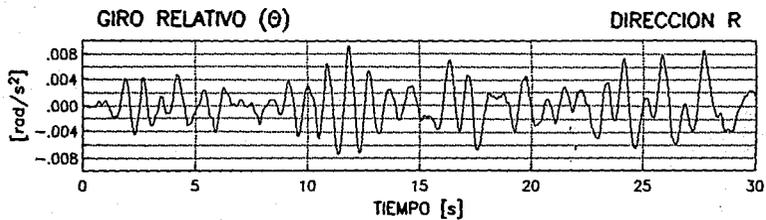
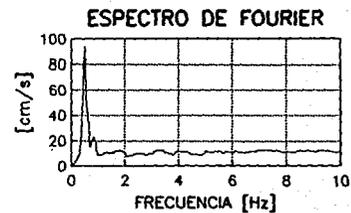
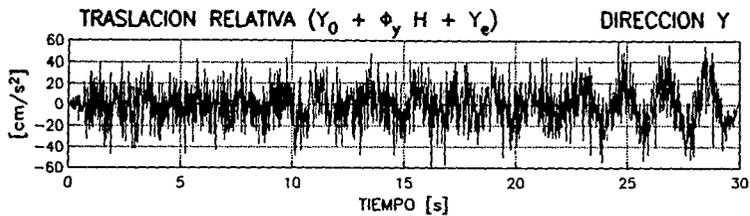
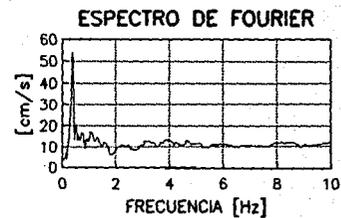
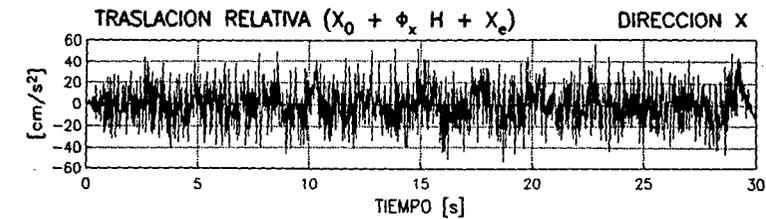


Fig 4.3a Respuestas simuladas asociadas a la superestructura

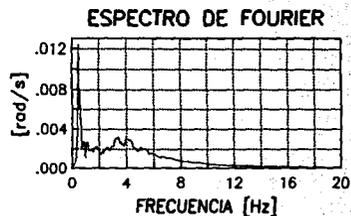
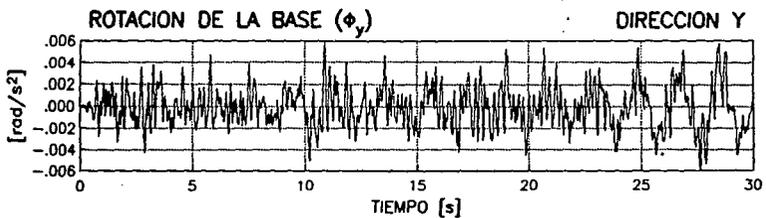
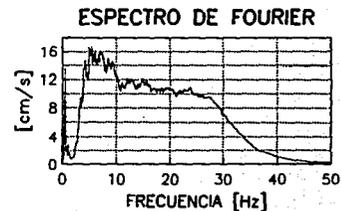
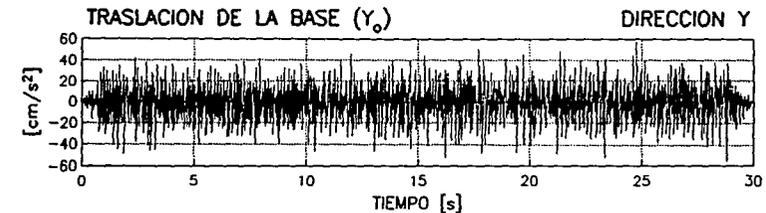
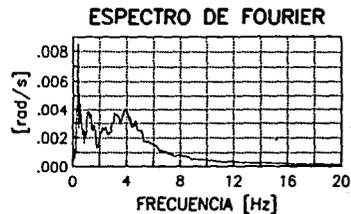
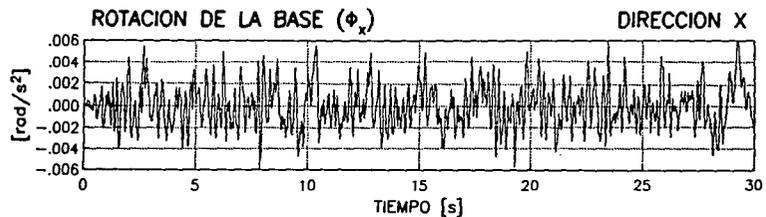
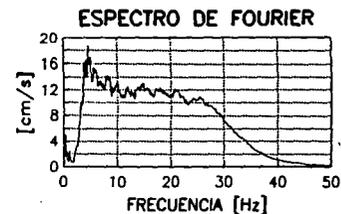
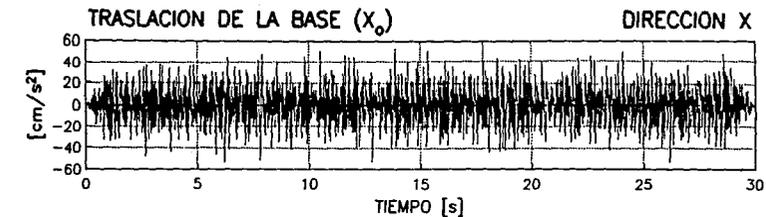


Fig 4.3b Respuestas simuladas asociadas al efecto de interacción suelo-estructura

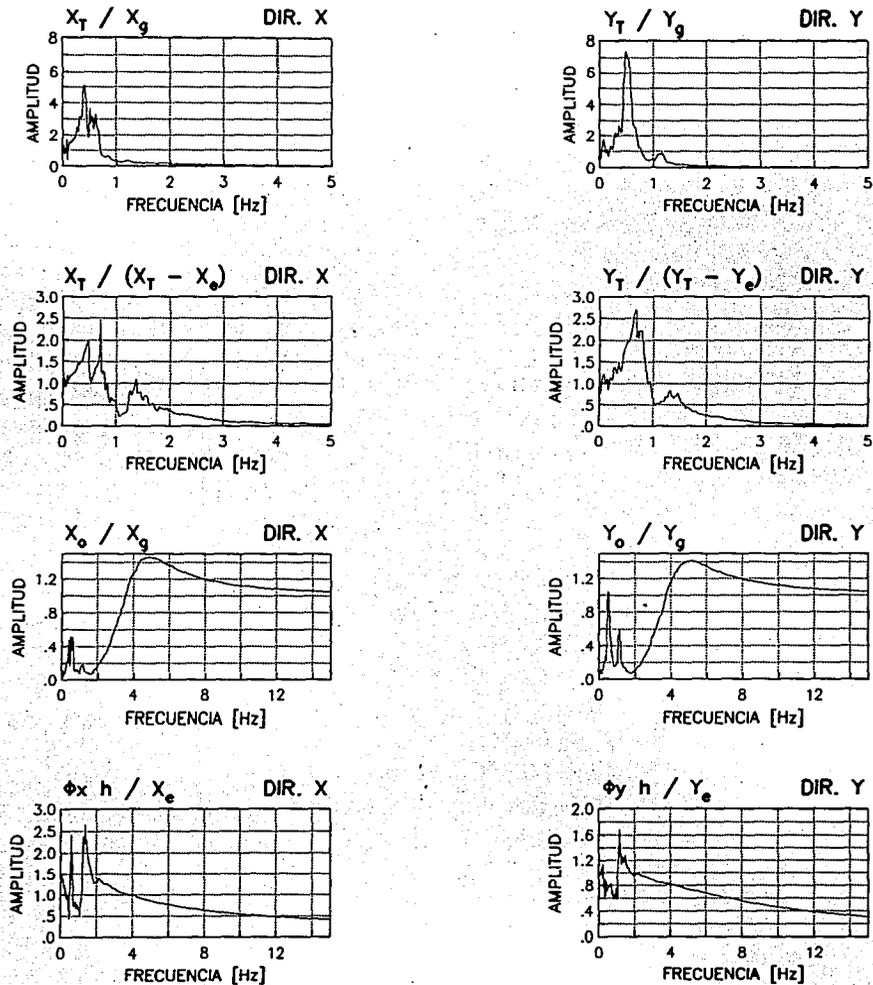


Fig. 4.4 Cocientes espectrales del análisis no paramétrico

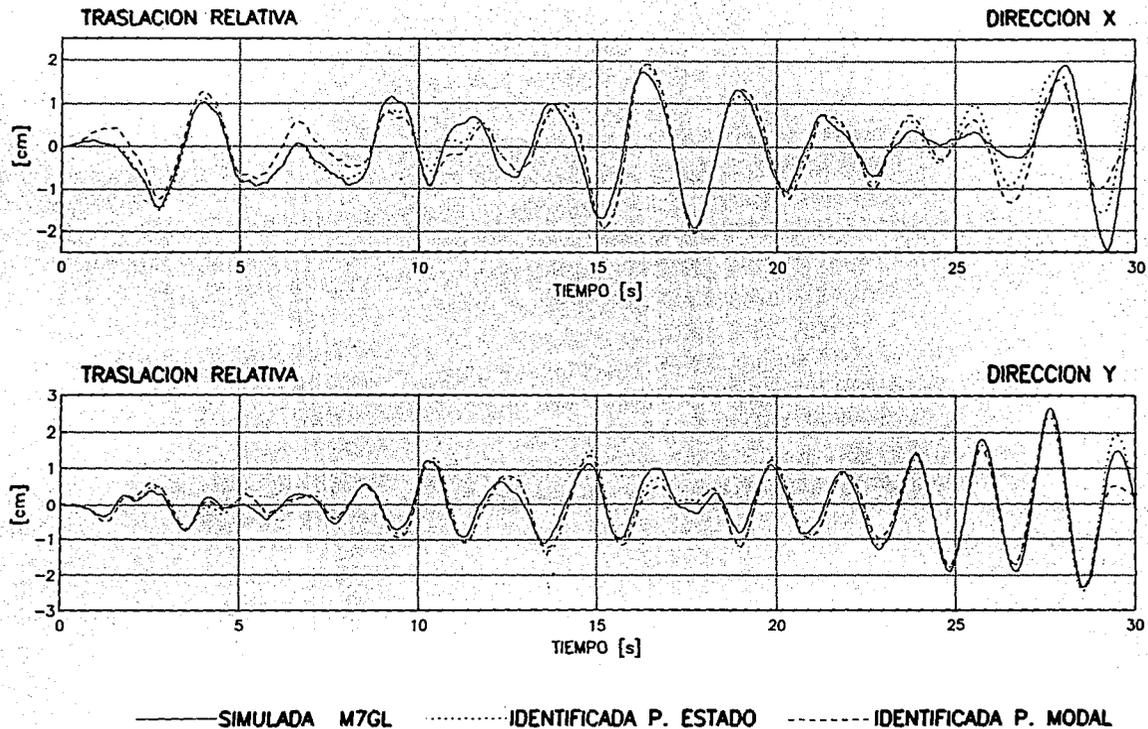


Fig 4.5 Comparación entre las señales simuladas con las identificadas por el M1GL utilizando el p. de estado y por el modelo 1N1GS2 utilizando el p. modal

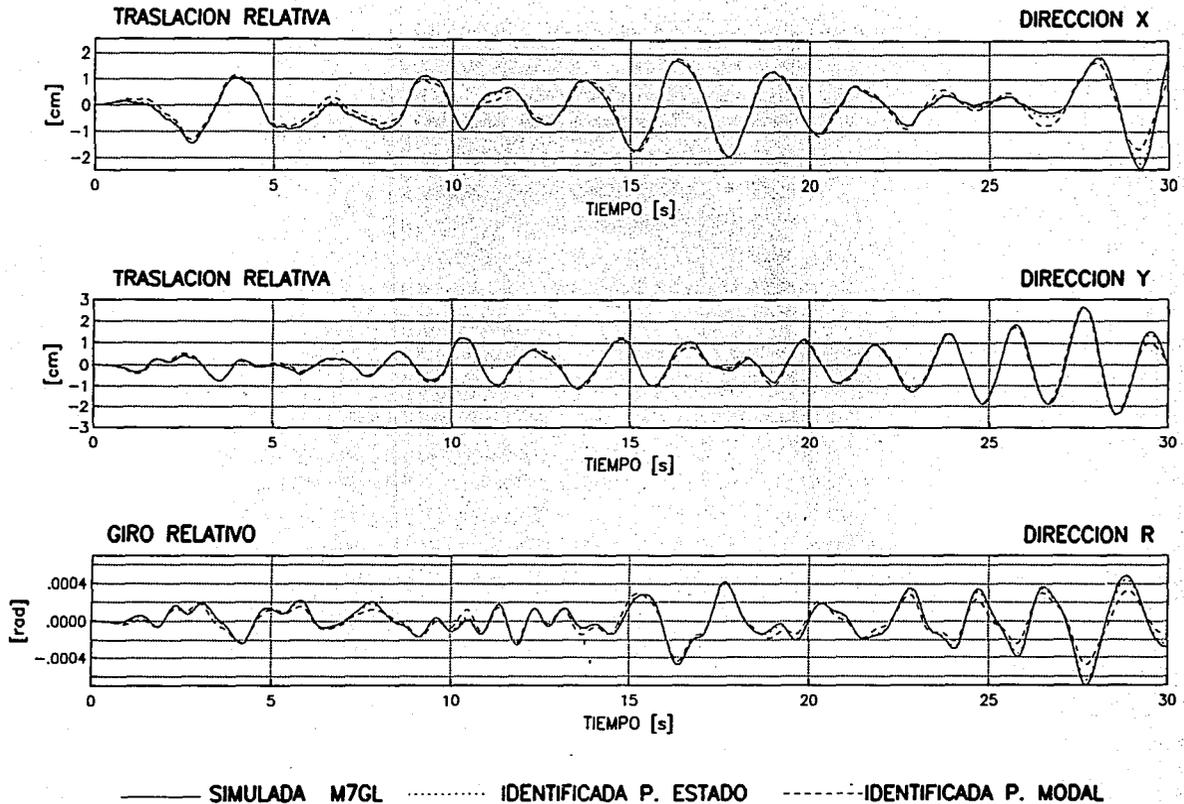
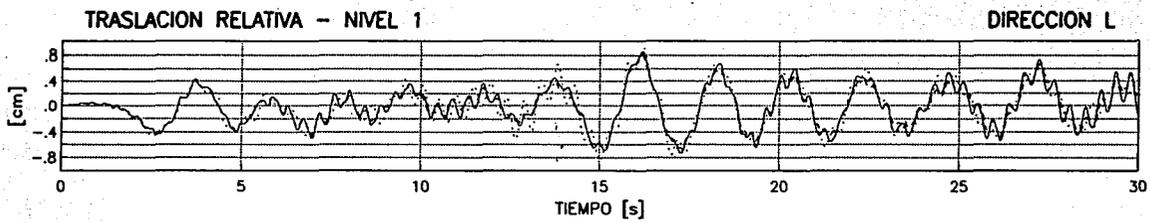
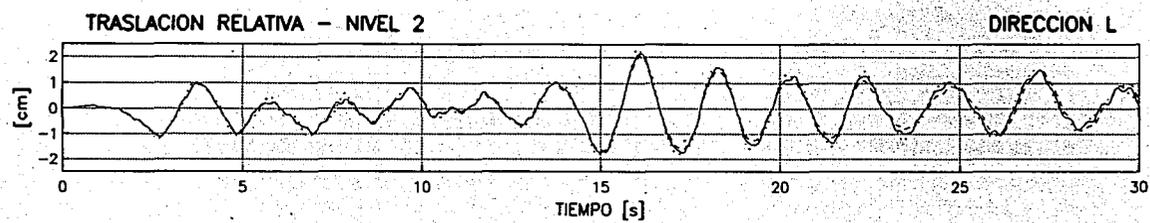
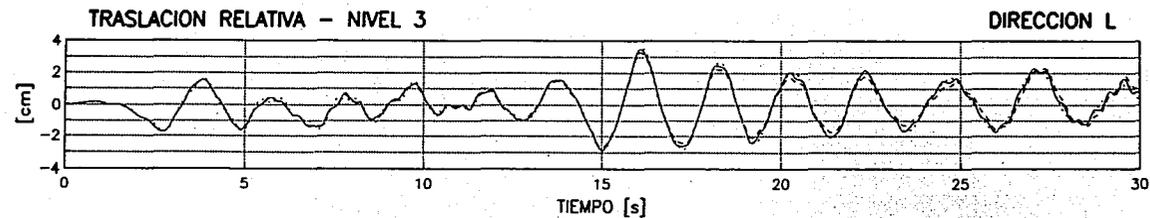


Fig 4.6 Comparación entre las señales simuladas con las identificadas por el M3GL-3D utilizando el p. de estado y por el modelo 1N2GAS2 utilizando el p. modal



—— SIMULADA IDENTIFICADA P. ESTADO - - - - IDENTIFICADA P. MODAL

Fig 4.7 Comparación entre las señales simuladas con las identificadas por el M5GL-2D utilizando el p. de estado y por el modelo 3N3GS2 utilizando el p. modal

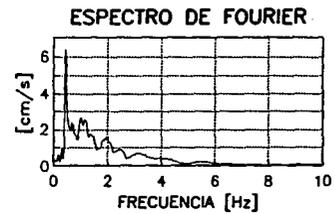
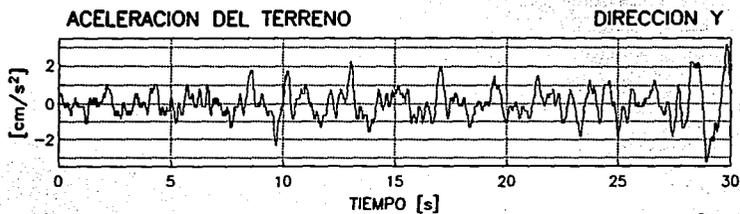
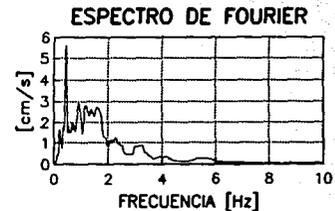
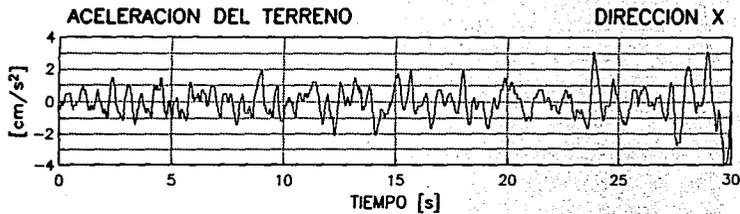


Fig 4.8 Señales de excitación - Registro sísmico del edificio Jal

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

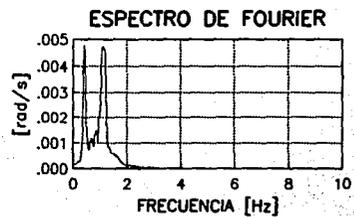
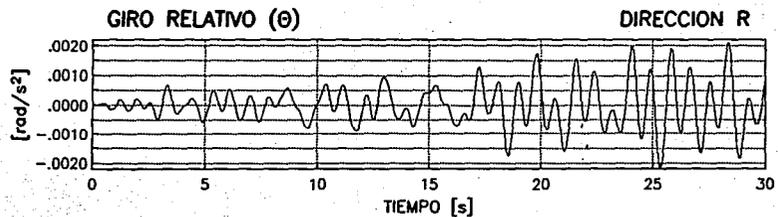
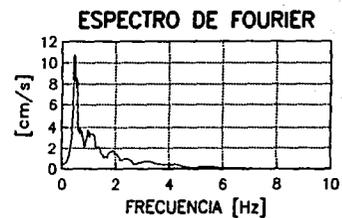
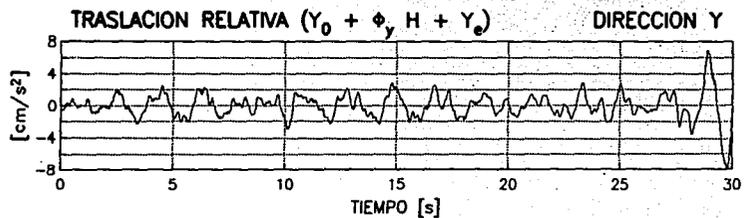
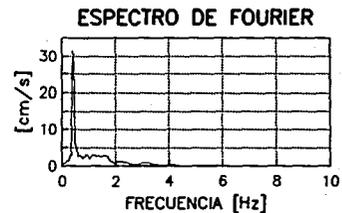
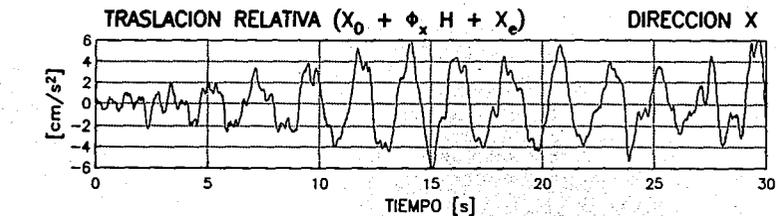


Fig 4.9a Respuestas simuladas asociadas a la superestructura

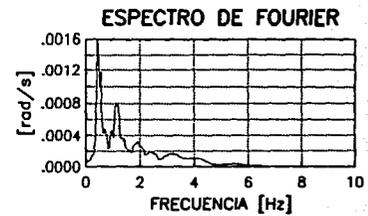
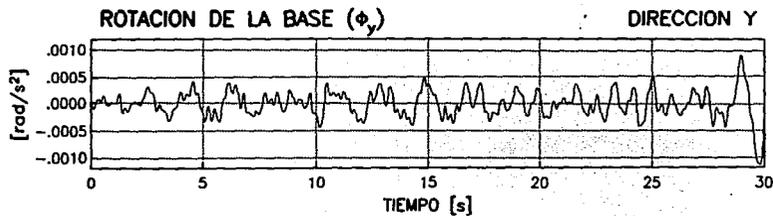
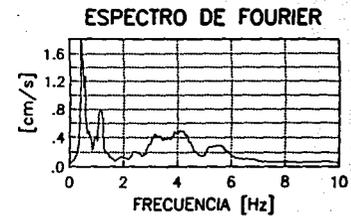
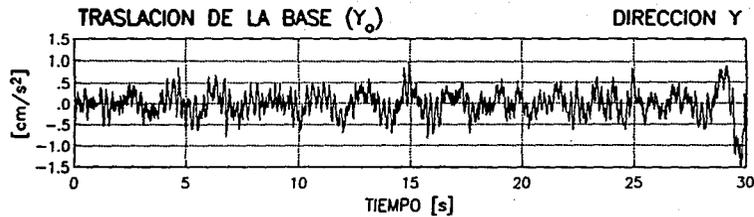
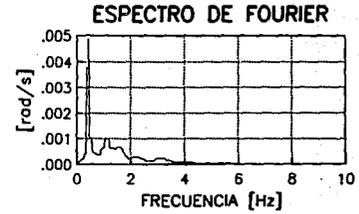
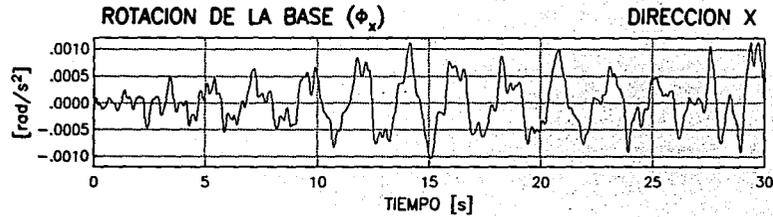
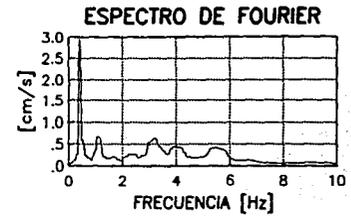
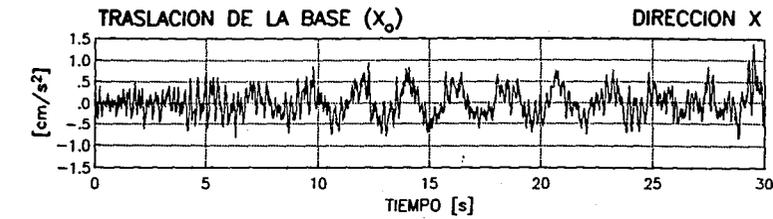


Fig 4.9b Respuestas simuladas asociadas al efecto de interacción suelo-estructura

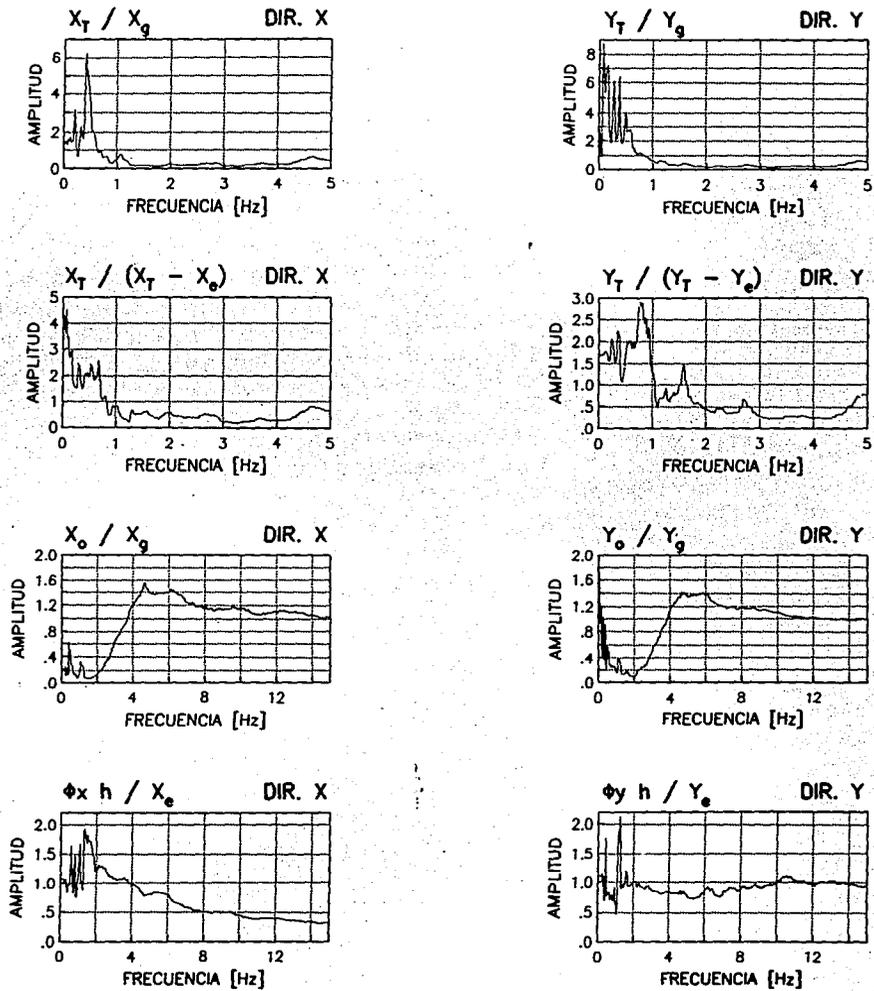
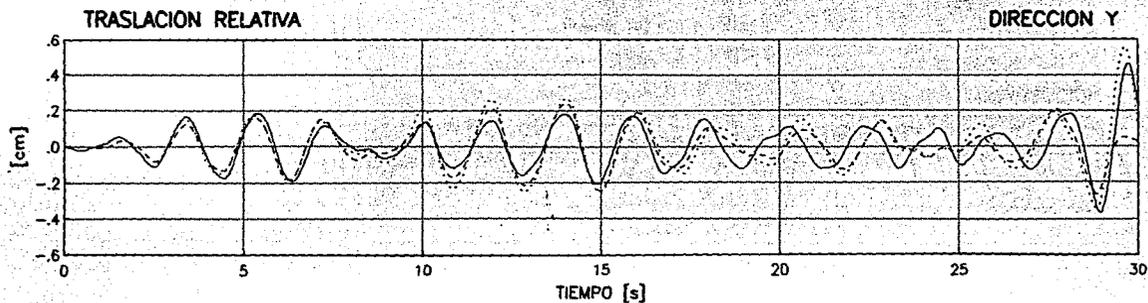
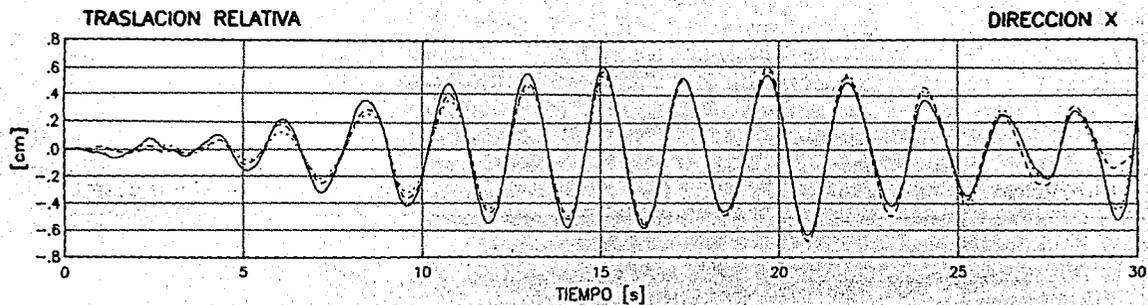


Fig 4.10 Cocientes espectrales del análisis no paramétrico



—— SIMULADA M7GL IDENTIFICADA P. ESTADO - - - - IDENTIFICADA P. MODAL

Fig 4.11 Comparación entre las señales simuladas con las identificadas por el M1GL utilizando el p. de estado y por el modelo 1N1GS2 utilizando el p. modal

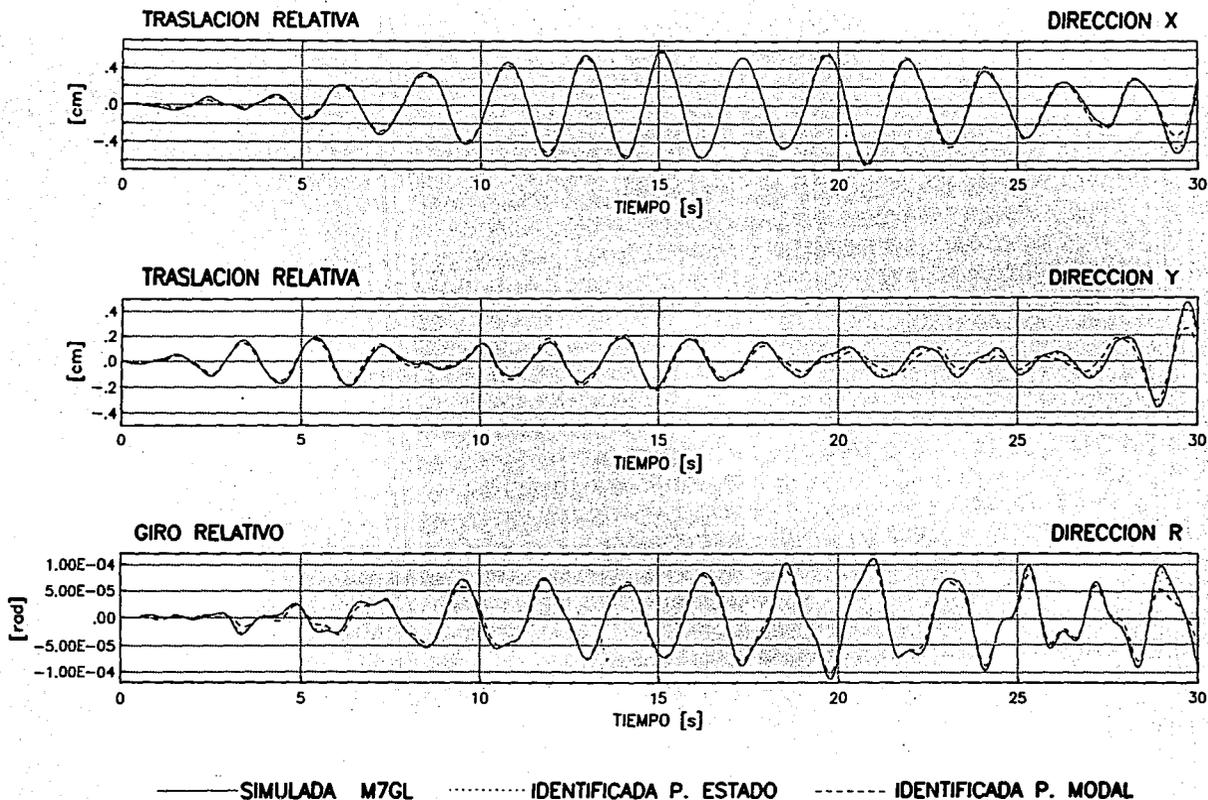


Fig 4.12 Comparación entre las señales simuladas con las identificadas por el M3GL-3D utilizando el p. de estado y por el modelo 1N2GAS2 utilizando el p. modal

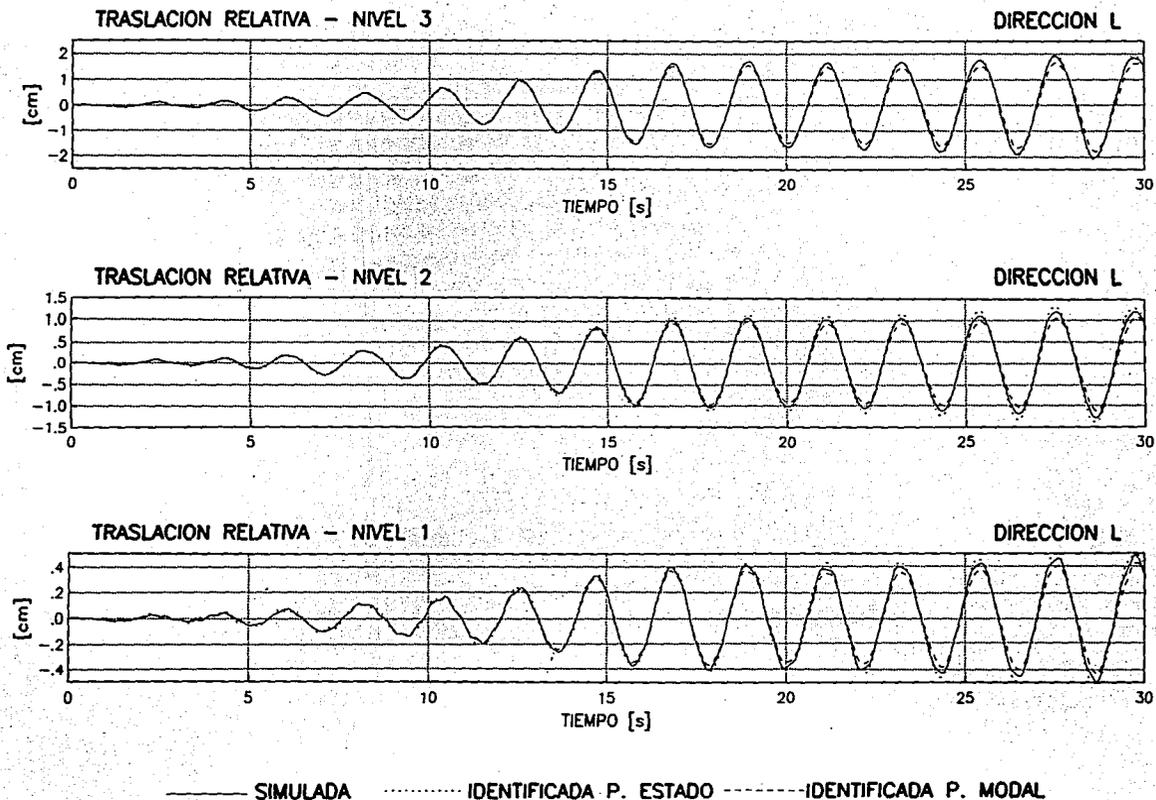


Fig 4.13 Comparación entre las señales simuladas con las identificadas por el M5GL-2D utilizando el p. de estado y por el modelo 3N3GS2 utilizando el p. modal

5. APLICACIONES EN EL EDIFICIO JAL

5.1 Descripción del edificio

El edificio está compuesto de una estructura principal de 14 niveles con un apéndice y un cuerpo anexo de tres niveles, los cuales están unidos en la planta del sótano y separadas, en los restantes niveles, por una junta constructiva de 15 cm de espesor. Los tres primeros niveles están destinados a estacionamientos y los demás a oficinas. El edificio se localiza en la zona de suelo blando de la ciudad de México, en la cual el espesor del suelo arcilloso es de 31 m y los depósitos profundos se encuentran a 38.5 m de profundidad (figs 5.1a y 5.1b; TGC Geotécnia, 1992). La frecuencia dominante en este sitio es 0.5 Hz.

La elevación y planta tipo del edificio se muestran en las figs 5.2 y 5.3, respectivamente. Su estructura es de concreto reforzado a base de columnas y losas reticulares. El edificio está rigidizado con muros de concreto y mampostería. El peralte de las losas reticulares es de 45 cm, de los cuales 5 cm corresponden a la capa de compresión.

La planta tipo de los niveles de oficina tiene forma rectangular de 20 m de ancho por 32 m de largo. Las alturas de entrepiso son constantes e iguales a 3.15 m. Las plantas de estacionamiento abarcan el cuerpo anexo y sus dimensiones son de 20 por 40 m. Los estacionamientos están escalonados y comunicados entre sí con rampas. Las alturas de entrepiso de los estacionamientos varían entre 2.5 y 4.45 m.

Las resistencias nominales del concreto de las columnas y muros se determinaron a partir de pruebas no destructivas y de ensaye de núcleos extraídos de dichos elementos, con valores de 314 Kg/cm² para los primeros siete niveles y 272 Kg/cm² para los restantes (Murià-Vila y Moreno, 1993).

La cimentación está compuesta por un cajón de concreto reforzado constituido de una losa reticular de 80 cm de peralte y desplantado a una profundidad de 3.30 m. La losa

de fondo se apoya sobre 54 pilotes de fricción de sección triangular de 60 cm de lado y 28 m de longitud, distribuidos como se muestra en la fig 5.4. Además hay diez pilotes, de forma cuadrada de 40 cm de lado y 26 m de longitud, intercalados con los anteriores y de tal manera que no están en contacto con el cajón de cimentación; el extremo superior se encuentra a una profundidad de 9 m.

Durante los sismos de septiembre de 1985 el edificio sufrió algunos daños en sus elementos estructurales y no estructurales, por lo que se restructuró reforzando algunas columnas interiores con un encamisado de concreto reforzado y construyendo muros del mismo material en la dirección longitudinal (Murià-Vila y Moreno, 1993).

5.2 Instrumentación sísmica

Durante octubre y noviembre de 1992, se instaló la instrumentación sísmica del edificio Jal. Se seleccionaron un total de 14 puntos de observación: dos en pozos profundos, uno en el terreno, cuatro en sótano, dos en el nivel 5, dos en el nivel 10 y tres en azotea (Quaas y Almora, 1993); cada estación está compuesta de acelerógrafos digitales con sensores triaxiales, dos horizontales y uno vertical.

En la fig 5.5 se presenta un croquis de la estructura especificando la localización de los instrumentos y su orientación. De acuerdo a su ubicación, a cada punto de medición se le asignó una clave de identificación, la cual se compone de dos caracteres: el primero identifica al nivel del edificio (pozo, sótano, nivel 5, nivel 10 o azotea) y el segundo su orientación (este, oeste, centro o norte). Las claves P1 y P2 corresponden a las estaciones de pozo a 20 y 45 m, respectivamente, y S a la estación del terreno.

Cada acelerógrafo funciona en forma independiente y autónoma con su propio sistema de registro y disparo, con el fin de integrarlos en una red. Los 14 equipos fueron interconectados para fines de disparo mediante una configuración maestro-esclavo. Al rebasar el movimiento el umbral preestablecido en el aparato maestro, éste envía una señal a todos los demás, configurados como esclavos, para que inicien el registro. Se seleccionó el aparato AO como maestro y se le programó con un umbral de disparo

de 6 gal para los componentes horizontales y 3 gal para el vertical.

Además, se alambrió el sistema para permitir la sincronía de todos los registros mediante una señal común de tiempo, el cual se registra simultáneamente con el tiempo interno de cada aparato.

Doce eventos, entre sismos y movimientos locales, produjeron un total de 142 acelerogramas durante 1993. Nueve de los eventos fueron identificados como movimientos sísmicos y tres se originaron por perturbaciones locales. Destacan los sismos del 15 de mayo (14 de mayo, hora local; $M_w = 5.8$ y 6.0) y del 24 de octubre ($M_w = 6.7$), cuyos epicentros se localizaron en las costas de Guerrero. En la tabla 5.1, se presenta un resumen de los datos registrados, así como las aceleraciones máximas por nivel.

Se han realizado varios análisis no paramétricos con los registros sísmicos (Murià-Vila y Meli, 1994; Moreno et al., 1994). Algunos resultados durante tres eventos sísmicos (93-3, 93-4 y 93-11) se presentan en la tabla 5.2, donde se comparan las frecuencias naturales identificadas experimentalmente; en la fig 5.6, donde se muestran algunas funciones de transferencia utilizadas para determinar las frecuencias asociadas a los modos de flexión y torsión; y en la fig 5.7, donde se muestran las formas modales de traslación del sistema estructural. Los resultados indican que las frecuencias son sensibles al nivel de amplitud de la excitación. Fenómenos similares han sido reportados en la literatura (Tanaka et al., 1969; Anderson et al., 1991), donde edificios instrumentados en Estados Unidos y Japón presentan cambios en sus frecuencias naturales de vibrar aún sin exhibir daños o con un mínimo de daño no estructural. Más aún, en pruebas de vibración forzada, se ha detectado un decremento en la frecuencia natural de vibración del edificio a medida que se incrementa el nivel de la amplitud de la excitación (Foutch D.A., 1978).

El amortiguamiento equivalente del sistema calculado por medio de la función de transferencia entre azotea y campo, indica valores entre 2 y 8 por ciento del amortiguamiento crítico.

5.3 Análisis no paramétrico simplificado

Se seleccionó el registro experimental captado en el edificio Jal el 24 de octubre de 1993. Este sismo ocurrió en el estado de Guerrero, con una magnitud $M_w = 6.7$. La aceleración máxima ocurrida en campo libre es de 13 gal y en la azotea es de 56 gal. Otras características de este evento sísmico se pueden apreciar en la tabla 5.1. Los acelerogramas registrados en la estación de campo libre y sus respectivos espectros de Fourier se presentan en la fig 5.8. Este evento tiene un rico contenido en baja frecuencia, y tiene una frecuencia dominante de 0.5 Hz. Los acelerogramas con sus respectivos espectros de Fourier, registrados en las estaciones de la azotea y del sótano del edificio utilizados para el análisis paramétrico, se presentan en las figs 5.9 y 5.10, respectivamente.

Se calcularon los espectros de Fourier y varios cocientes espectrales con los registros experimentales y se obtuvieron las características dinámicas del edificio asociadas a la traslación de la superestructura y del sistema suelo-estructura para cada dirección, la de torsión del sistema y las asociadas a la traslación y cabeceo de la base para cada dirección (figs 5.11a y 5.11b).

Los cocientes espectrales asociados al efecto de interacción suelo-estructura presentan varias amplitudes importantes para diferentes frecuencias; por lo tanto, es difícil obtener directamente las frecuencias del sistema. Para obtener las frecuencias correspondientes a la traslación y al cabeceo de la base, se basó en las frecuencias identificadas aplicando un modelo simplificado para edificios flexibles (Luco, 1980; Luco, 1987). Los resultados de aplicar este modelo simplificado en el edificio Jal para el sismo en estudio se presentan en la referencia de Murià-Vila et al., 1995. En la tabla 5.3 se presenta la comparación entre las frecuencias identificadas del análisis no paramétrico y las calculadas con el modelo simplificado propuesto por Luco. Los resultados de este análisis son muy buenos, obteniéndose como máxima diferencia 10% para la frecuencia asociada a la traslación de la superestructura en dirección transversal.

Los amortiguamientos del sistema obtenidos del análisis no paramétrico son de 4.1 y 5.2 % para las direcciones transversal y longitudinal, respectivamente.

5.4 Análisis paramétrico con los planteamientos de estado y modal

Con las características dinámicas identificadas del análisis no paramétrico (tabla 5.3), se calcularon los valores iniciales de los parámetros a identificar para realizar el análisis paramétrico, utilizando los dos planteamientos de identificación de sistemas propuestos.

Se aplicó el planteamiento de estado con el M1GL y se identificaron satisfactoriamente los parámetros y las características dinámicas del sistema estructural (tabla 5.4). La máxima diferencia en las frecuencias fundamentales del sistema identificadas con el planteamiento de estado con respecto a las identificadas con el análisis no paramétrico es de 5%, la cual corresponde a la dirección longitudinal. Aplicando el planteamiento modal con el modelo de mejor comportamiento en las simulaciones del capítulo 4 (1N1GS2), también se identifican adecuadamente las características dinámicas del sistema (tabla 5.5). Sin embargo, comparando los errores relativos de las señales identificadas, se concluye que con el planteamiento modal se obtienen mejores ajustes que aplicando el planteamiento de estado; en la fig 5.12 se comparan las respuestas experimentales con las identificadas utilizando ambos planteamientos.

Aplicando el planteamiento de estado con el M3GL-2D se identifican bien las características dinámicas correspondientes a la traslación de la superestructura para ambas direcciones; sin embargo, se presentan problemas con las asociadas al efecto de interacción suelo-estructura. Esto se debe principalmente a que los registros asociados al efecto de interacción generalmente carecen de buena resolución en amplitud con respecto a los registros asociados a la superestructura, dado que el porcentaje de ruido con respecto al total de la señal es muy elevado para los registros de la base, lo que implica grandes incertidumbres en el análisis paramétrico. Debido a esto, se utilizaron como valores iniciales para los parámetros de la superestructura, los obtenidos de la identificación paramétrica con el M1GL, y para los asociados al efecto de interacción suelo-estructura, los calculados de un estudio de los efectos de sitio y respuesta de edificios en la ciudad de México durante sismos (Meli et al., 1994). Los parámetros y las características dinámicas identificados con este modelo se presentan en la tabla 5.6. Se aplicaron los modelos 1N3GT Y 1N4GAT con el

planteamiento modal y se identificaron bien las características dinámicas de la superestructura para los componentes traslacionales en cada dirección y torsional (tabla 5.7), e igual que para el planteamiento de estado, no se identifican adecuadamente las relacionadas al efecto de interacción suelo-estructura.

Utilizando el planteamiento de estado con el M3GL-3D se identificaron muy bien las características dinámicas del edificio (tabla 5.8). Si se comparan las frecuencias identificadas con este modelo con respecto a las identificadas del análisis no paramétrico, la máxima diferencia es de 5.5% para el componente torsional; y con respecto a las fracciones de amortiguamiento crítico, la máxima diferencia es de 17% para la dirección longitudinal. Se aplicó el modelo 1N2GAS2 con el planteamiento modal, y con este modelo también se obtienen adecuadamente las características dinámicas del sistema estructural. Sin embargo, los errores relativos de las señales identificadas son menores que los obtenidos con el planteamiento de estado. En la fig 5.13 se presenta la comparación de las señales experimentales con las identificadas utilizando ambos planteamientos.

El M5GL-2D se utilizó en otro trabajo aplicando el planteamiento de estado con los registros sísmicos del edificio Jal del 15 de mayo de 1993 (González et al., 1993), donde fue posible reproducir la respuesta en la azotea del edificio; así como definir los parámetros de rigidez y amortiguamiento que caracterizan al sistema estructural; las frecuencias de vibrar identificadas del análisis no paramétrico se comparan con las identificadas del análisis paramétrico en la tabla 5.10, donde se aprecia que aplicando este planteamiento de estado se pueden reproducir bien las frecuencias fundamentales del sistema estructural, con una diferencia máxima de 5%, correspondiente a la dirección transversal. Sin embargo, este planteamiento no es adecuado para identificar las frecuencias de vibrar de modos superiores, presentándose diferencias máximas de 19% y 46% para los modos dos y tres, respectivamente.

Se han propuesto alternativas para modelar sistemas de múltiples grados de libertad con el planteamiento de estado, aprovechando las propiedades de ortogonalidad de las matrices estructurales, con el fin de disminuir el número de parámetros a evaluar. Además, con base en proporciones entre las características de los modos superiores con respecto a la del modo fundamental obtenidas de un análisis no paramétrico, se

han logrado identificar las características dinámicas de los modos superiores (González et al., 1994). Al aplicar modelos con el planteamiento de estado fijando dichas proporciones para el edificio Jal, se podría tener una estimación preliminar de las frecuencias superiores; sin embargo, este análisis no sería válido al utilizar registros sísmicos de eventos de moderados a intensos, porque estas relaciones cambian durante el evento sísmico, debido a la degradación de rigidez y resistencia que sufre el sistema estructural (Murià-Vila et al., 1995).

Para contrarrestar la deficiencia del planteamiento de estado en cuanto a la identificación de las frecuencias de los modos superiores con el M5GL-2D, se han hecho análisis por ventanas con diferentes registros sísmicos captados en el edificio Jal, y se ha detectado la variación de los parámetros con el tiempo durante cada evento sísmico (González et al., 1994). Por otro lado, se aplicó el planteamiento modal utilizando los modelos 3N5GT, 3N3GT, 3N3GS1 Y 3N3GS2 en las dos direcciones ortogonales del edificio, y se lograron identificar muy bien las frecuencias para los tres primeros modos de vibrar del sistema estructural (tabla 5.11). Los errores de estimación obtenidos son aceptables y del mismo orden que los obtenidos aplicando el mismo planteamiento modal para otros sistemas estructurales (Li y Mau, 1991); además, las respuestas identificadas se ajustaron satisfactoriamente con las experimentales (figs 5.14a y 5.14b).

Para tener en cuenta el acoplamiento entre los componentes traslacionales con la torsional, se aplicaron los modelos 3N6GAT Y 3N6GAS2 para cada dirección utilizando el planteamiento modal; efectivamente, con estos modelos se lograron identificar, además de las características dinámicas traslacionales, las torsionales (tabla 5.12). En las figs 5.15a, 5.15b y 5.15c se comparan las señales experimentales con las identificadas por el modelo 3N6GAS2 para los componentes longitudinal, trasversal y torsional, respectivamente.

En la tabla 5.13 se comparan las frecuencias de vibrar identificadas del análisis no paramétrico simplificado con las identificadas del análisis paramétrico utilizando el planteamiento modal; aquí se aprecia una muy buena correlación, presentándose diferencias máximas de 3% y 6% para las frecuencias fundamentales de los componentes traslacional y torsional, respectivamente.

Finalmente, del análisis con el planteamiento modal se derivan las formas modales de traslación del edificio Jal para las dos direcciones ortogonales. En la fig 5.16 se comparan las formas modales determinadas del análisis no paramétrico con los registros experimentales (Murià-Vila et al., 1995) y las identificadas con este planteamiento; se aprecia una correlación muy buena.

5.5 Comentarios

Para realizar el análisis paramétrico con los registros experimentales del edificio Jal se utilizaron los planteamientos de estado y modal con diferentes modelos matemáticos. Algunos modelos tienen comportamientos equivalentes cuando se aplican con los planteamientos propuestos y su eficiencia para la identificación paramétrica se compara utilizando un parámetro común para ambos planteamientos; el parámetro común es el índice de error de la identificación, el cual indica qué tan bien está hecho el ajuste de las respuestas identificadas con respecto a las experimentales. Los errores obtenidos con los registros experimentales del edificio Jal son del mismo orden que los obtenidos para otros sistemas estructurales (Li y Mau, 1991).

Para identificar las características dinámicas globales del sistema estructural, ambos planteamientos se pueden utilizar eficientemente. Sin embargo, si además interesan los parámetros explícitos de rigidez y amortiguamiento para los diferentes componentes del sistema, es mejor utilizar el planteamiento de estado.

Se tienen grandes incertidumbres para identificar los parámetros y las características dinámicas del efecto de interacción suelo-estructura, debido a la baja calidad de los registros de la base en cuanto a su resolución, tanto en frecuencia como en amplitud; también afectan el alto nivel de ruido presente en los registros, y los modelos simplificados para representar el sistema edificio-suelo.

El utilizar el planteamiento de estado con modelos donde se fijan las proporciones de las frecuencias superiores con respecto a la frecuencia fundamental del sistema, puede ser de utilidad para tener una estimación preliminar de dichas frecuencias; si por el contrario, se liberan las proporciones entre las frecuencias y se aplica el mismo

planteamiento pero con modelos considerando matrices de rigidez y amortiguamiento llenas, se presentan problemas numéricos para la convergencia a la solución global del sistema, debido a la cantidad de parámetros que se deben dejar libres para la identificación paramétrica. Además, estos análisis no serían válidos al utilizar registros sísmicos de eventos de moderados a intensos, porque dichas relaciones cambian durante el evento sísmico debido a la degradación de rigidez y resistencia que sufre el sistema estructural.

Utilizando el planteamiento modal se lograron identificar las frecuencias para los modos superiores del sistema estructural del edificio Jal, y su correlación con las identificadas del análisis no paramétrico simplificado es muy buena.

A pesar de que el sistema estructural del edificio Jal presenta un acoplamiento entre los componentes traslacional en dirección longitudinal y torsional, ambos planteamientos identifican adecuadamente las características dinámicas de cada componente usando modelos simplificados que consideran el comportamiento tridimensional del sistema. En el planteamiento de estado se obtienen grandes errores al considerar modelos desacoplados (p.e. M1GL, tabla 5.4), pero cuando se utilizan modelos que tienen en cuenta el acoplamiento (p.e. M3GL-3D, tabla 5.8), además de reducirse el error de la estimación paramétrica, se obtienen explícitamente los valores de las excentricidades. Sin embargo, en el planteamiento modal los errores totales obtenidos de las estimaciones paramétricas con modelos que consideran el acoplamiento se incrementan con respecto a los obtenidos con modelos desacoplados, principalmente porque los registros de torsión presentan individualmente errores relativos mayores que los de traslación, y esto hace que el error total se incremente.

Además, se observó que el efecto de interacción suelo-estructura en el edificio Jal no fue significativo en la respuesta global del sistema, dado que no se encontró un cambio importante de la frecuencia de vibrar de la superestructura con respecto a la del sistema, ni un aumento apreciable en el amortiguamiento equivalente del sistema suelo-estructura.

TABLA 5.1 RESUMEN DE LOS DATOS REGISTRADOS DURANTE 1993 EN EL EDIFICIO JAL

No del evento	Tipo de evento	Fecha	Hora GMT	No de registros	A máx campo libre (gal)	A máx pozo 20 m (gal)	A máx base (gal)	A máx niv 5 (gal)	A máx niv 10 (gal)	A máx azotea (gal)
93-1	Sismo, Guerrero, M=5	31/03/93	10:19:48	4	--	--	--	--	--	9.58(T)
93-2	Sismo, Guerrero, M=5.8	04/04/93	14:23:34	2	--	--	1.32(V)	--	1.68(V)	--
93-3	Sismo, Guerrero, M=6	15/05/93	03:11:11	14	4.31(L)	0.84(T)	3.83(L)	7.19(T)	7.66(T)	11.50(T)
93-4	Sismo, Guerrero, M=6	15/05/93	03:13:59	14	10.78(V)	2.04(L)	8.86(L)	15.81(T)	21.08(L)	27.78(L)
93-5	Local	18/05/93	14:58:55	1	2.4(V)	--	--	--	--	--
93-6	Local	20/05/93	20:17:34	13	0.36(V)	0.24(V)	3.11(V)	3.95(V)	7.07(V)	36.88(V)
93-7	Sismo, Guerrero, M=4.6	29/07/93	20:18:26	14	1.92(V)	0.48(T)	2.16(T)	5.75(V)	4.31(T)	7.66(T)
93-8	Sismo, México-Guatemala, M=5.3	03/09/93	12:39:08	14	1.92(T)	0.36(L)	1.68(L)	2.87(T)	8.14(T)	10.06(T)
93-9	Sismo, México-Guatemala, M=5.3	03/09/93	12:40:12	14	0.96(T)	0.36(L)	0.96(T)	1.92(T)	5.27(T)	6.71(T)
93-10	Sismo, México-Guatemala, M=7.1	10/09/93	19:16:56	14	2.87(T)	0.36(L)	2.63(T)	4.31(T)	10.06(T)	12.45(T)
93-11	Sismo, Guerrero, M=6.7	24/10/93	07:53:15	14	13.17(T)	2.16(T)	13.29(T)	23.47(L)	44.55(L)	56.52(L)
93-12	Sismo, Guerrero, M=5.3	13/11/93	00:18:59	14	2.4(T)	0.24(T)	2.16(T)	3.35(L)	5.75(T)	7.19(T)

TABLA 5.2 FRECUENCIAS NATURALES DE VIBRACIÓN IDENTIFICADAS EXPERIMENTALMENTE

EVENTO	FECHA	MODO	FRECUENCIA (Hz)			$A_{m\acute{a}x}$ (cm/s ²)	$\gamma_{m\acute{a}x}$ (x 10 ⁻³)
			L	T	R		
93-3	15/may/93	1	0.65	0.37	0.57 - 0.67	11	0.46
		2	2.58	1.34	2.16 - 2.28		
		3	4.81	2.47	3.50 - 3.80		
93-4	15/may/93	1	0.61	0.35	0.51 - 0.60	28	0.94
		2	2.66	1.29	1.89 - 1.97		
		3	4.72	2.25	3.30 - 3.48		
93-11	24/oct/93	1	0.57	0.35	0.50 - 0.55	56	1.42
		2	2.47	1.26	1.86 - 1.92		
		3	4.67	2.20	3.02 - 3.20		

L = Dirección Longitudinal, T = Dirección Trasversal, R = Torsión
 $A_{m\acute{a}x}$ = Aceleración máxima
 $\gamma_{m\acute{a}x}$ = Distorsión de entrepiso máxima

TABLA 5.3 COMPARACIÓN ENTRE LAS FRECUENCIAS IDENTIFICADAS CON EL ANÁLISIS NO PARAMÉTRICO Y LAS CALCULADAS CON EL MODELO SIMPLIFICADO PROPUESTO POR LUCO PARA EL EDIFICIO JAL

COMPONENTE	A. NO P. f(Hz)	LUCO f(Hz)	DIF. (%)
TRASLACIONAL SISTEMA - DIR. T	0.35	0.35	0.0
TRASLACIONAL SISTEMA - DIR. L	0.57	0.53	7.5
TRASLACIONAL SUPERESTR. - DIR. T	0.37	0.41	9.8
TRASLACIONAL SUPERESTR. - DIR. L	0.70	0.65	7.7
TORSIONAL	0.54	0.53	1.9
TRASLACIONAL BASE - DIR. T	0.79	0.83	4.8
TRASLACIONAL BASE - DIR. L	2.83	2.85	0.7
CABECEO BASE - DIR. T	1.04	1.05	1.0
CABECEO BASE - DIR. L	1.63	1.62	0.6

TABLA 5.4 PARÁMETROS, CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS IDENTIFICADAS CON EL M1GL Y ERRORES DE ESTIMACIÓN UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	K(t/cm)	C(t s/cm)	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
TRASLACIONAL - DIR. T	38.7	1.5	0.35	4.3	51.78
TRASLACIONAL - DIR. L	91.3	2.5	0.54	4.7	115.87
TRASLACIONAL SUPERESTR. - DIR. T	42.8	1.6	0.37	3.9	194.56
TRASLACIONAL SUPERESTR. - DIR. L	103.8	4.6	0.58	4.2	42.99

TABLA 5.5 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL MODELO 1N1GS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)
TRASLACIONAL - DIR. T	0.36	4.0	50.1
TRASLACIONAL - DIR. L	0.56	8.3	34.6

TABLA 5.6 PARÁMETROS, CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS IDENTIFICADAS CON EL M3GL-2D Y ERRORES DE ESTIMACIÓN UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	K	C	f(Hz)	ERR (%)
TRASLACIONAL - DIR. T	45.2	1.99	0.35	54.29
TRASLACIONAL - DIR. L	103.8	4.59	0.52	70.27
TRASLACIONAL BASE - DIR. T	1893	74.8	5.56	98.96
TRASLACIONAL BASE - DIR. L	1835	76.2	5.56	113.41
CABECEO BASE - DIR. T	2.22×10^9	7.25×10^7	11.11	317.38
CABECEO BASE - DIR. L	5.03×10^9	1.71×10^8	11.11	106.58

TABLA 5.7 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON LOS MODELOS 1N3GT Y 1N4GAT UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

MODELO	COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR	ERROR TOTAL (%)
1N3GT	TRASLACIONAL - T	0.35	4.7	36.0	39.5
1N4GAT	TRASLACIONAL - T	0.35	5.8	38.4	55.2
	TORSIONAL	0.50	0.2	58.1	
1N3GT	TRASLACIONAL - L	0.55	6.3	41.8	42.3
1N4GAT	TRASLACIONAL - L	0.55	6.2	41.8	46.1
	TORSIONAL	0.50	4.9	52.2	

TABLA 5.8 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS IDENTIFICADAS CON EL M3GL-3D Y ERRORES DE ESTIMACIÓN UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO

COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)	ERROR TOTAL (%)
TRASLACIONAL - DIR. T	0.35	4.4	53.09	48.30
TRASLACIONAL - DIR. L	0.55	6.1	46.52	
TORSIONAL	0.51	3.8	54.23	

TABLA 5.9 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON EL MODELO 1N2GAS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

COMPONENTE	f(Hz)	ξ (%)	ERROR (%)	ERROR T (%)
TRASLACIONAL - T	0.36	4.4	50.6	37.1
TORSIONAL	0.50	5.0	33.2	
TRASLACIONAL - L	0.56	8.1	34.6	41.0
TORSIONAL	0.50	4.6	50.5	

TABLA 5.10 COMPARACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE VIBRAR IDENTIFICADAS CON EL ANÁLISIS NO PARAMÉTRICO Y CON EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO DE ESTADO PARA EL EVENTO SISMICO 93-3

COMPONENTE	MODO	A. NO P. f(Hz)	A. P. f(Hz)	DIF. (%)
TRASLACIONAL - DIR T	1	0.37	0.39	5.4
	2	1.34	1.18	11.9
	3	2.47	1.45	41.3
TRASLACIONAL - DIR L	1	0.65	0.66	1.5
	2	2.58	2.09	19.0
	3	4.81	2.59	46.2

TABLA 5.11 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON LOS MODELOS 3N5GT, 3N3GT, 3N3GS1 Y 3N3GS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

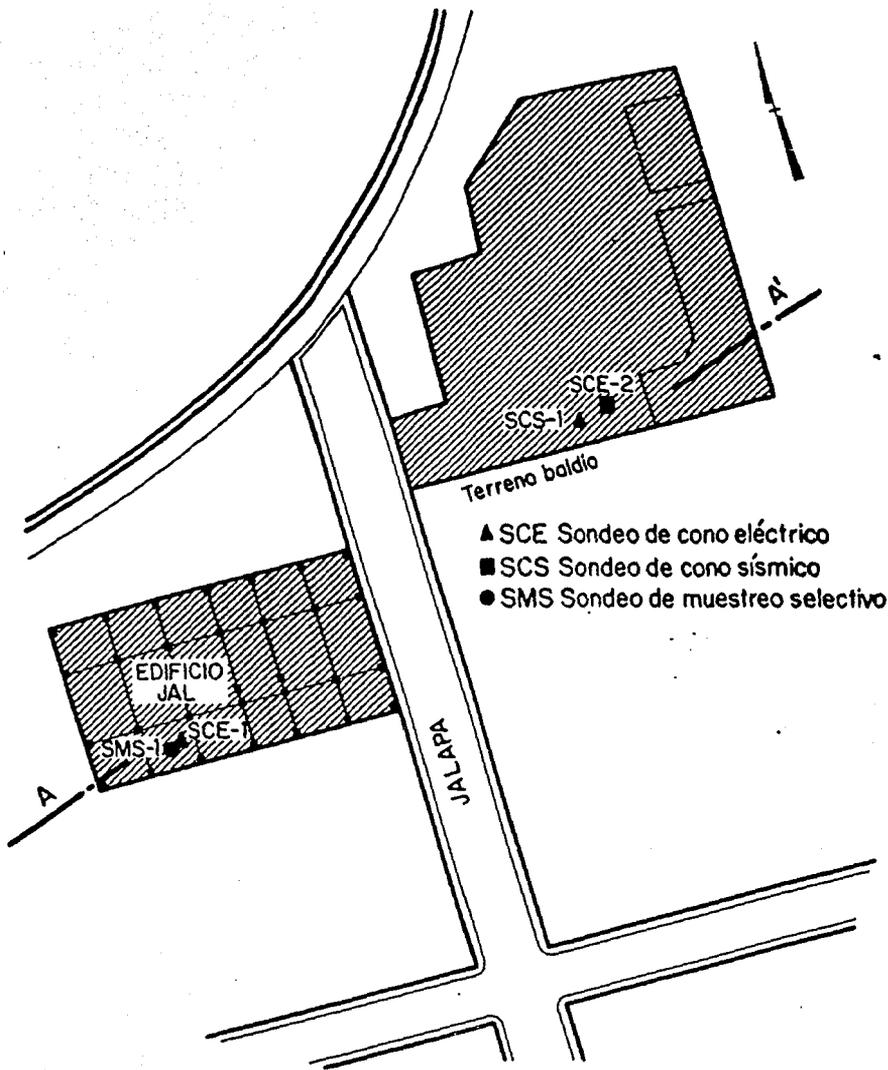
PARÁMETROS	DIRECCIÓN L				DIRECCIÓN T			
	3N5GT	3N3GT	3N3GS1	3N3GS2	3N5GT	3N3GT	3N3GS1	3N3GS2
f_1 (Hz)	0.55	0.55	0.56	0.56	0.35	0.35	0.36	0.36
f_2 (Hz)	2.55	2.54	2.43	2.43	1.33	1.33	1.28	1.28
f_3 (Hz)	5.14	4.65	4.67	4.66	2.19	2.16	2.20	2.20
ξ_1 (%)	6.1	6.1	7.9	7.9	5.5	5.5	3.8	4.1
ξ_2 (%)	9.1	8.5	9.0	9.0	7.9	7.9	5.1	5.1
ξ_3 (%)	43.3	40.0	7.4	7.0	5.2	3.6	4.5	5.0
ERROR N3 (%)	41.8	41.8	34.5	34.5	39.4	39.4	32.6	31.7
ERROR N2 (%)	42.4	42.4	35.5	35.5	31.0	31.0	40.3	36.3
ERROR N1 (%)	48.8	48.8	45.5	45.4	56.7	56.8	59.0	57.0
ERROR SOT (%)	96.3	---	---	---	94.3	---	---	---
ERROR TOT (%)	42.8	42.5	35.6	35.5	41.9	39.6	39.1	37.0

TABLA 5.12 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y ERRORES DE ESTIMACIÓN IDENTIFICADOS CON LOS MODELOS 3N6GAT Y 3N6GAS2 UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

PARÁMETROS	DIRECCIÓN L		DIRECCIÓN T	
	3N6GAT	3N6GAS2	3N6GAT	3N6GAS2
f_1 (Hz)	0.50	0.50	0.35	0.36
f_2 (Hz)	0.55	0.56	0.50	0.50
f_3 (Hz)	1.95	2.07	1.33	1.28
f_4 (Hz)	2.51	2.44	1.95	1.93
f_5 (Hz)	3.28	3.29	2.11	2.11
f_6 (Hz)	4.15	4.45	3.13	2.27
ξ_1 (%)	5.0	4.5	5.7	4.2
ξ_2 (%)	6.3	7.8	0.1	0.1
ξ_3 (%)	0.2	5.0	7.9	5.0
ξ_4 (%)	8.3	5.0	0.2	1.6
ξ_5 (%)	0.2	0.1	1.1	1.7
ξ_6 (%)	15.8	5.5	23.2	2.3
ERROR N3 (%)	41.7	34.3	40.1	32.2
ERROR N2 (%)	42.2	35.3	31.0	30.6
ERROR N1 (%)	48.2	45.3	57.0	52.5
ERROR TOR3 (%)	52.1	50.1	70.8	72.3
ERROR TOR2 (%)	51.7	50.0	70.1	72.2
ERROR TOR1 (%)	60.1	57.6	74.4	71.8
ERROR TOT (%)	46.2	41.5	66.1	64.7

TABLA 5.13 COMPARACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE VIBRAR IDENTIFICADAS CON EL ANÁLISIS NO PARAMÉTRICO Y CON EL ANÁLISIS PARAMÉTRICO UTILIZANDO EL PLANTEAMIENTO MODAL

COMPONENTE	MODO	A. NO P. f(Hz)	P. MODAL f(Hz)	DIF. (%)
TRASLACIONAL - DIR T	1	0.35	0.36	2.9
	2	1.26	1.28	1.6
	3	2.20	2.20	0.0
TRASLACIONAL - DIR L	1	0.57	0.56	1.8
	2	2.47	2.43	1.6
	3	4.67	4.67	0.0
TORSIONAL	1	0.50 - 0.55	0.50	5.7
	2	1.86 - 1.92	1.95	3.2
	3	3.02 - 3.20	3.28	5.5



- ▲ SCE Sondeo de cono eléctrico
- SCS Sondeo de cono sísmico
- SMS Sondeo de muestreo selectivo

Fig 5.1a Localización de sondeos

CORTE ESTRATIGRÁFICO A-A'

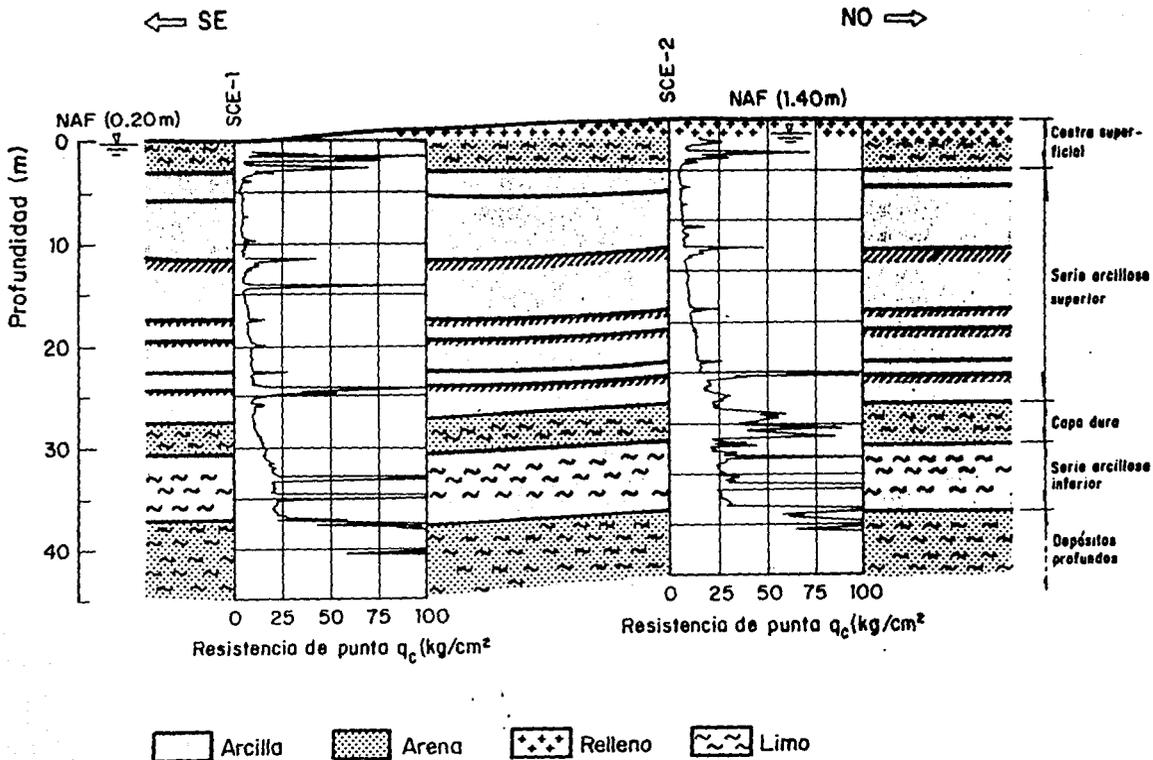
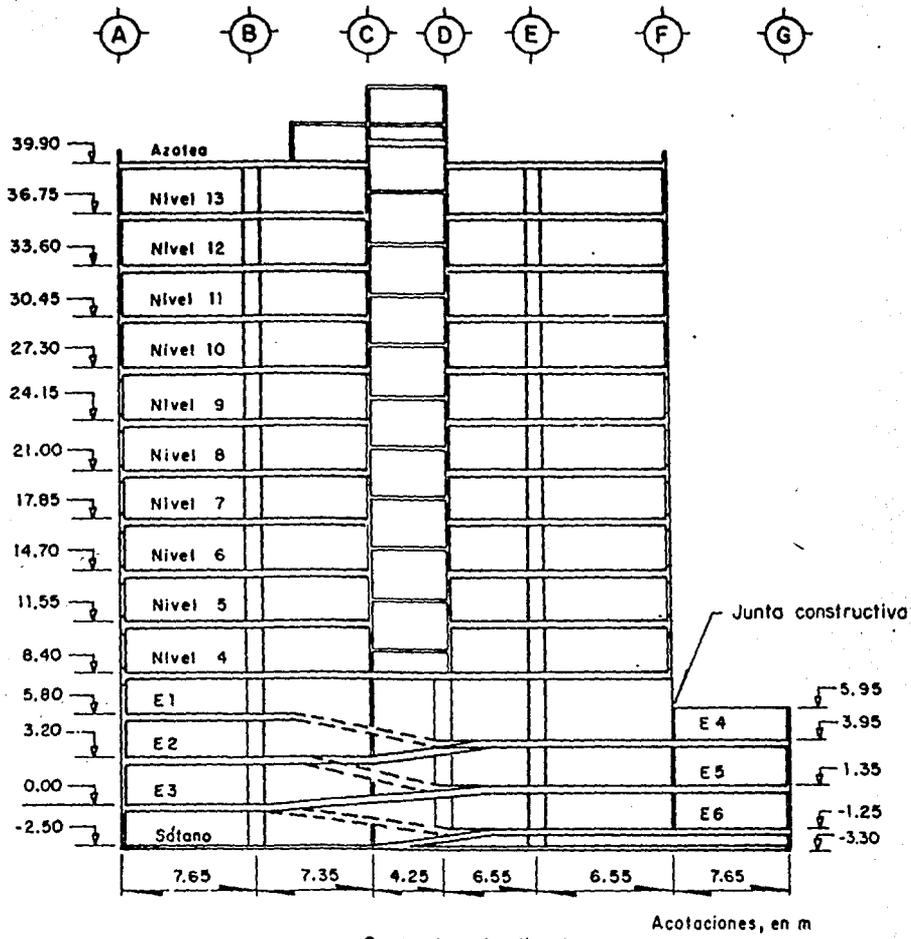


Fig 5.1b Corte estratigráfico A-A'



Corte longitudinal

Fig 5.2 Corte longitudinal del edificio

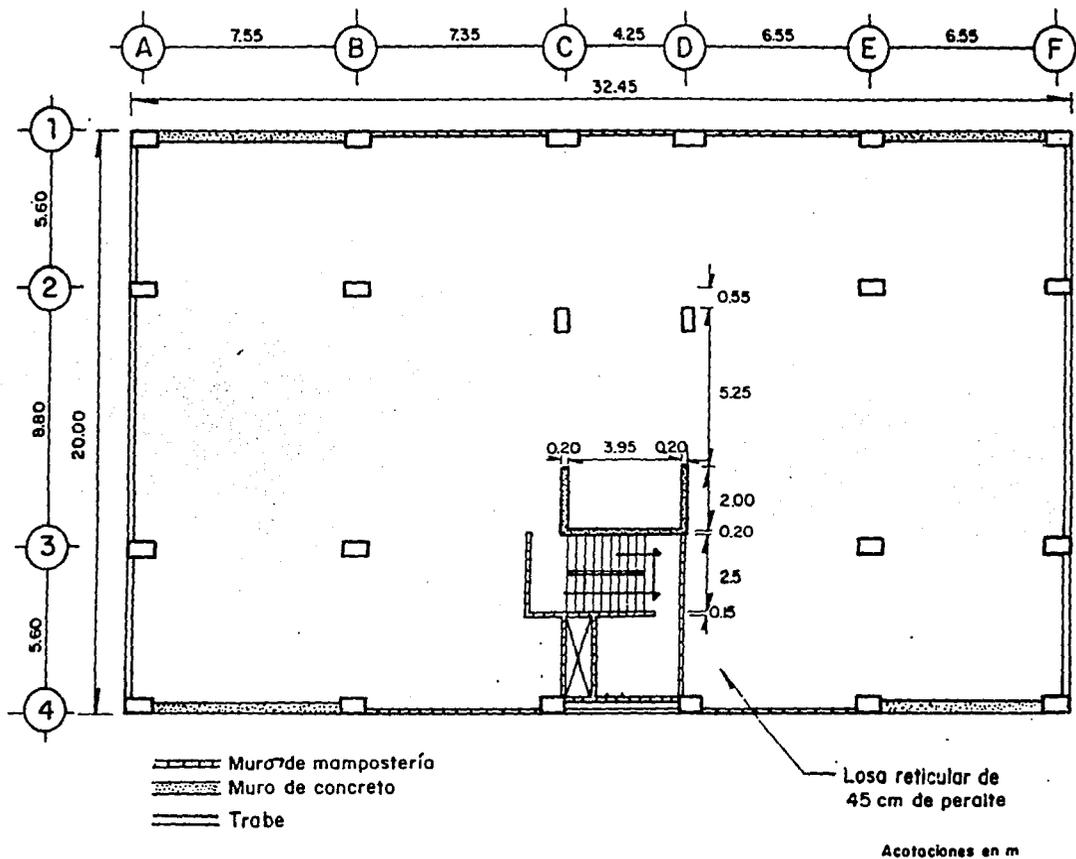


Fig 5.3 Planta tipo de los niveles de oficina

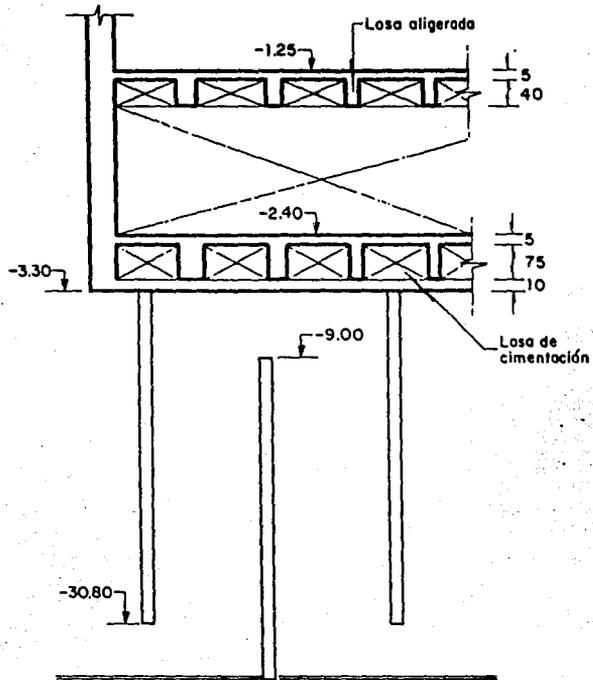


Fig 5.4 *Corte de la cimentación del edificio*

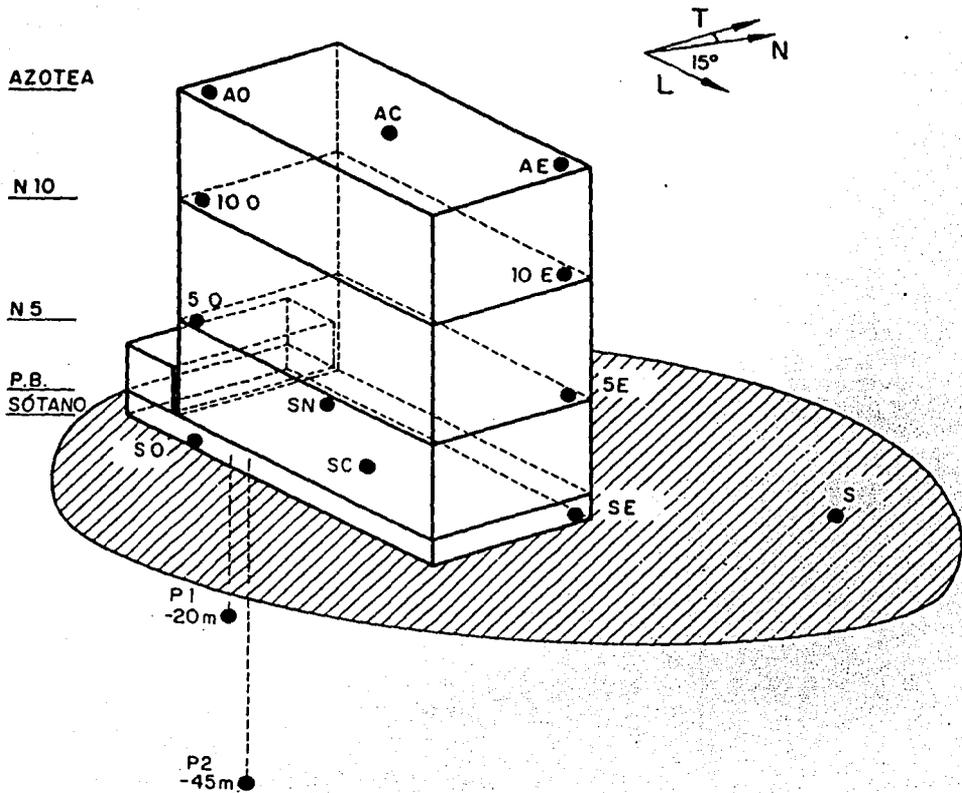


Fig 5.5 Localización de la instrumentación sísmica del edificio

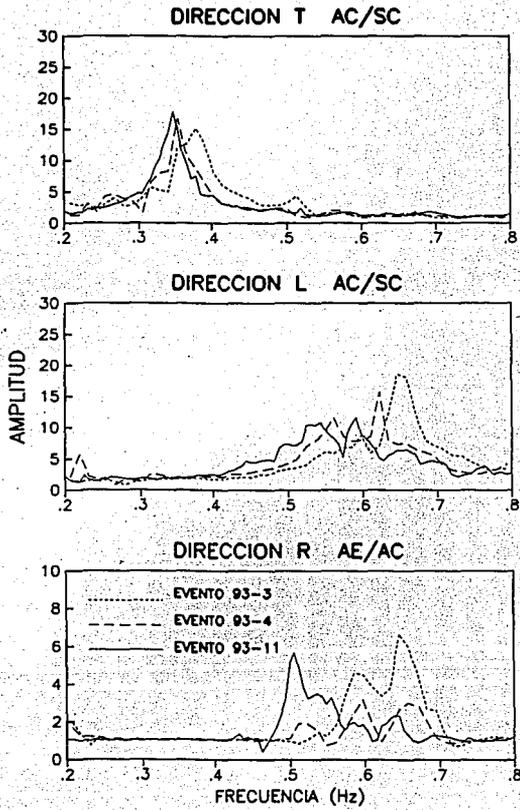


Fig 5.6

Funciones de transferencia obtenidas de los registros sísmicos

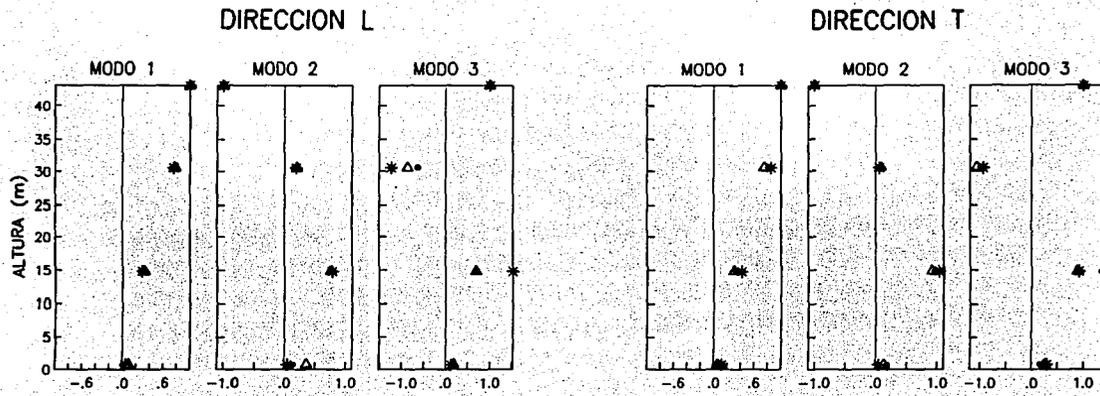


Fig 5.7 Formas modales de traslación (* - 93-3, Δ - 93-4, • - 93-11)

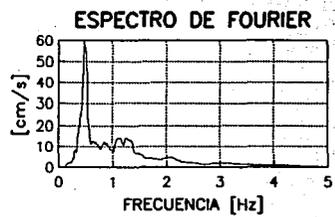
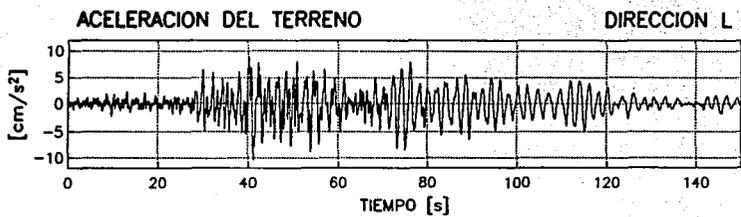
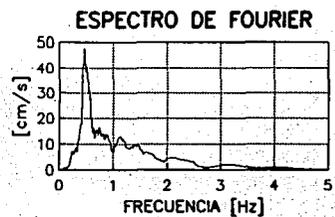
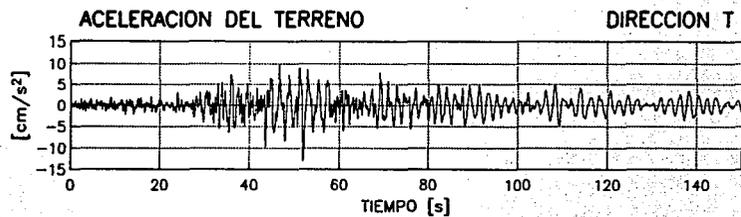


Fig 5.8 Acelerogramas registrados en campo libre

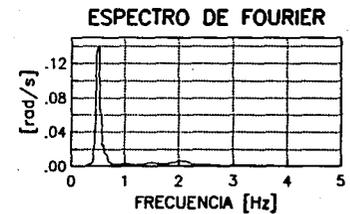
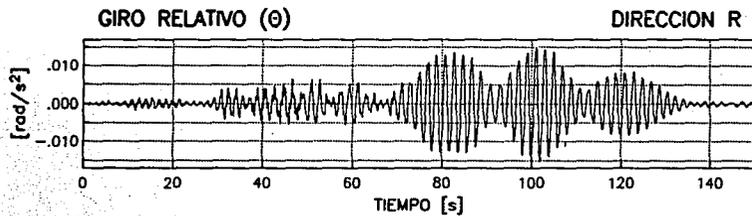
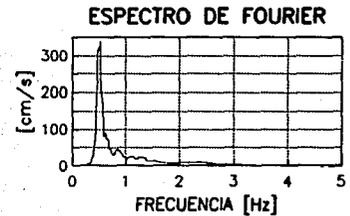
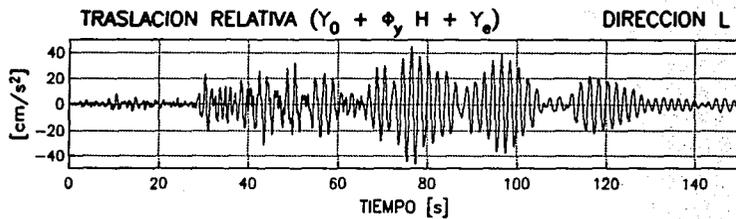
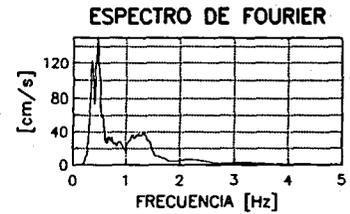
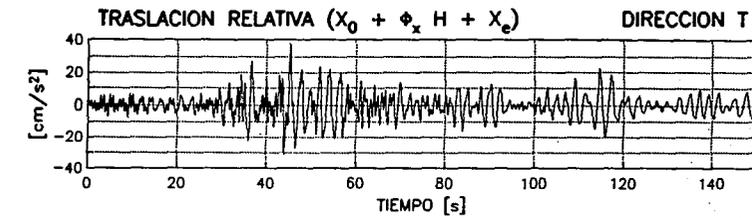


Fig 5.9 Acelerogramas registrados en la azotea del edificio

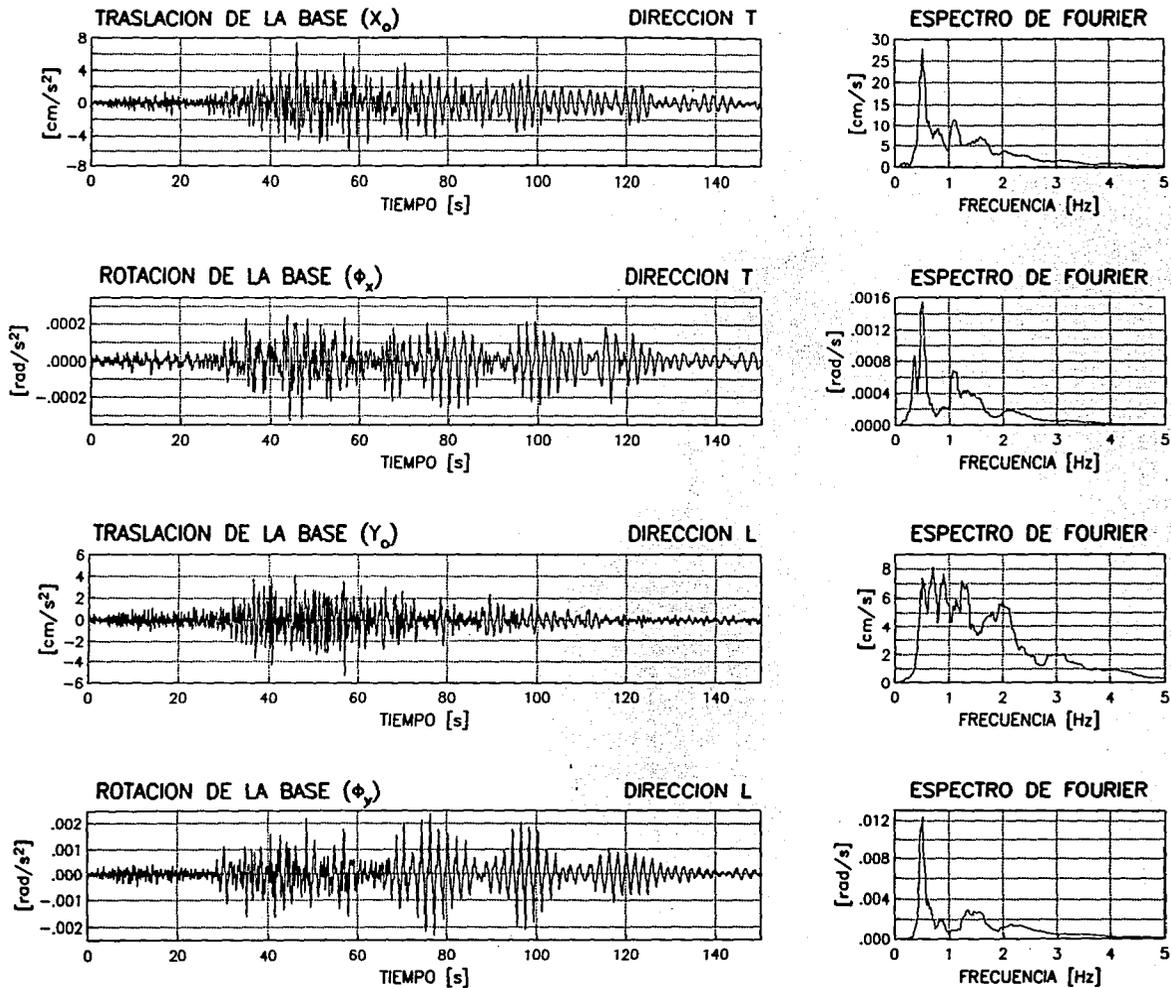


Fig 5.10 Acelerogramas registrados en el sótano del edificio

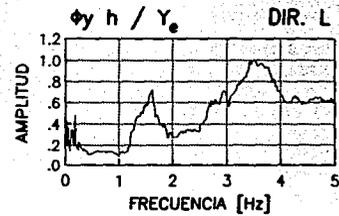
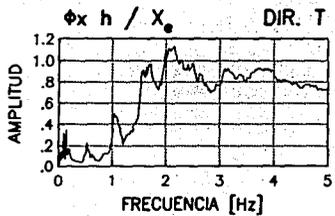
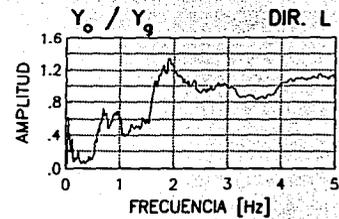
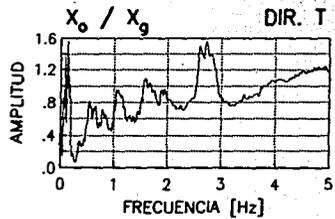
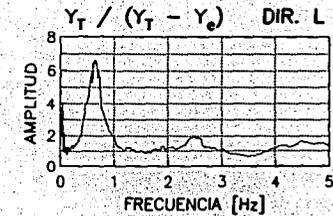
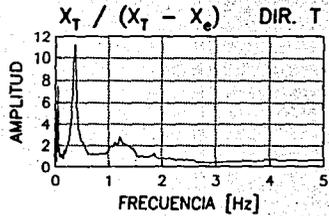
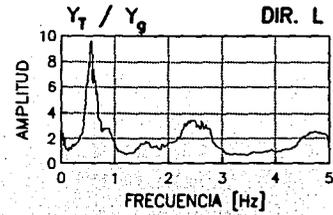
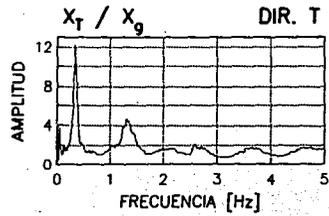


Fig 5.11a Cocientes espectrales del análisis no paramétrico

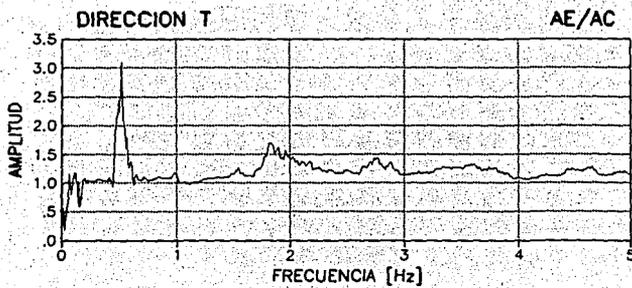
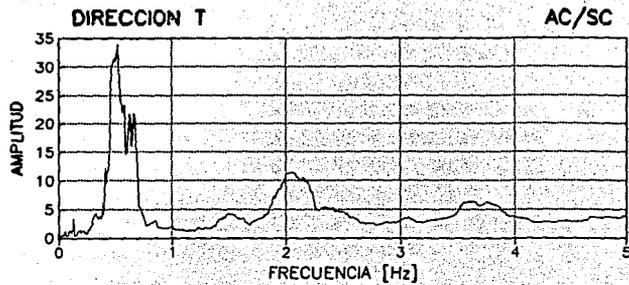


Fig 5.11b Cocientes espectrales del análisis no paramétrico

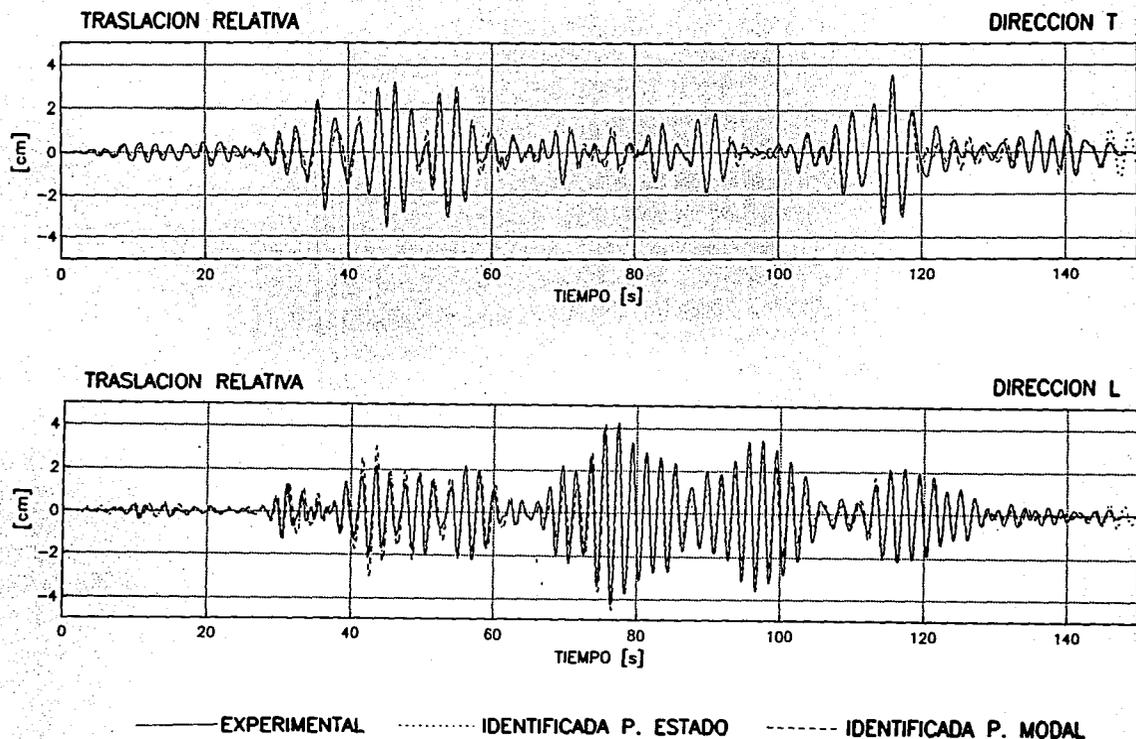


Fig 5.12 Comparación entre las señales experimentales con las identificadas por el M1GL utilizando el p. de estado y por el modelo 1N1GS2 utilizando el p. modal

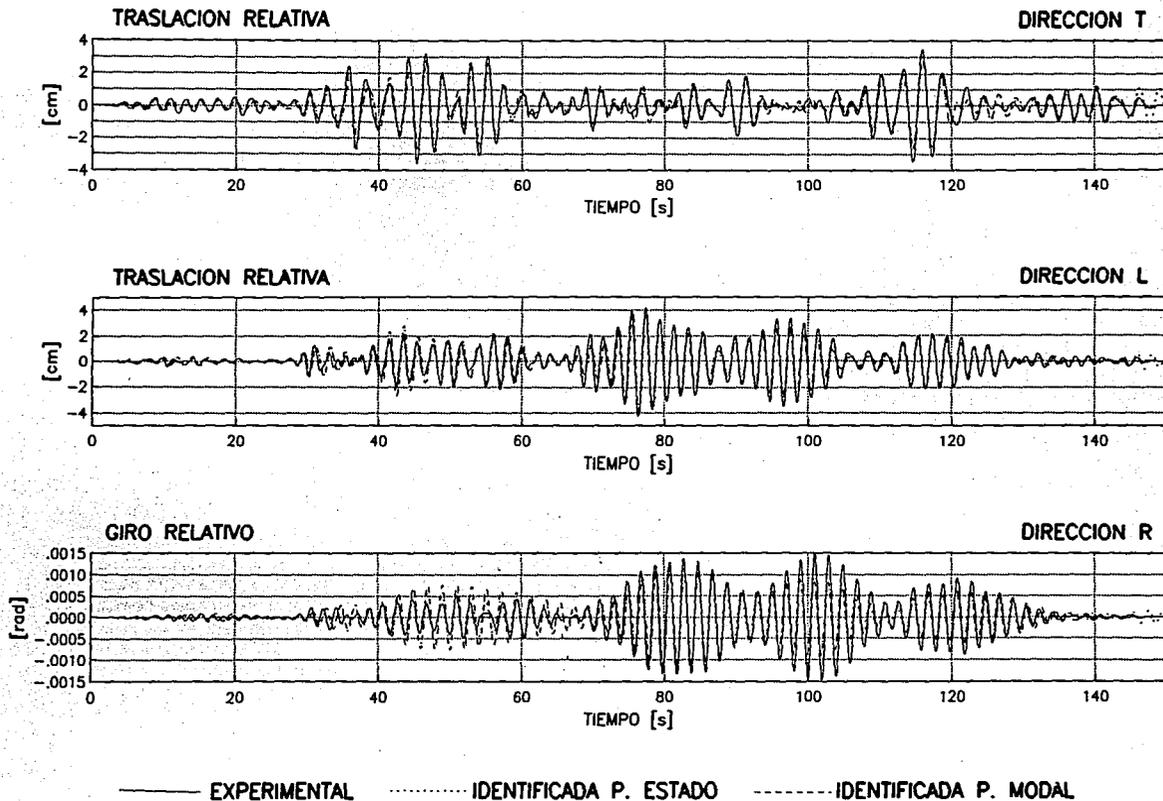


Fig 5.13 Comparación entre las señales experimentales y las identificadas por el M3GL-3D con el p. de estado y por el modelo 1N2GAS2 con el p. modal

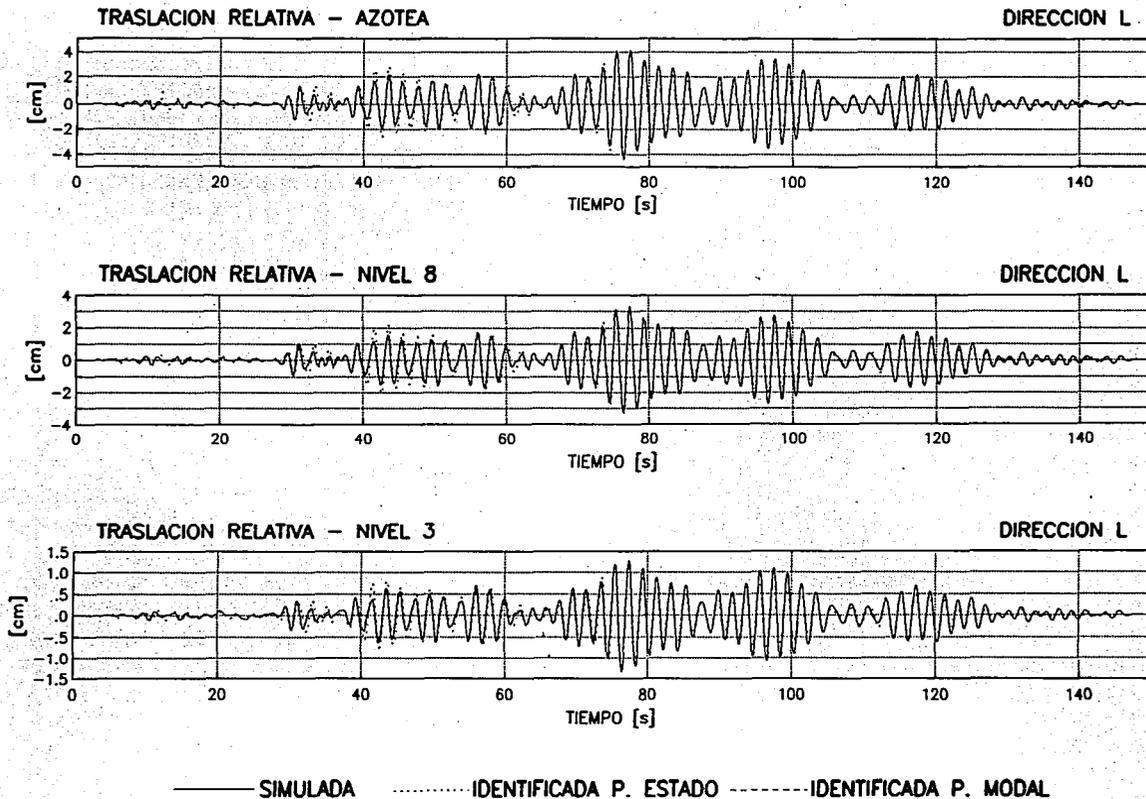


Fig 5.14a Comparación entre las señales experimentales con las identificadas por el modelo 3N3GS2 utilizando el planteamiento modal

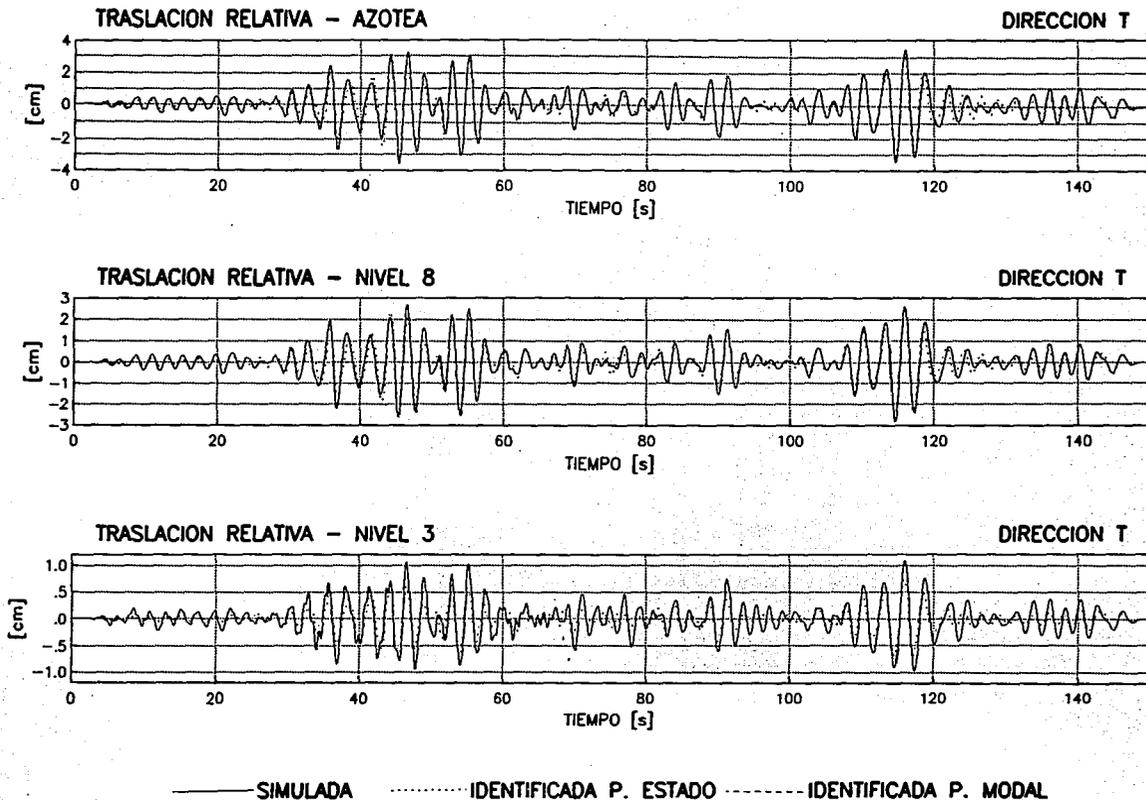


Fig 5.14b Comparación entre las señales experimentales con las identificadas por el modelo 3N3GS2 utilizando el planteamiento modal

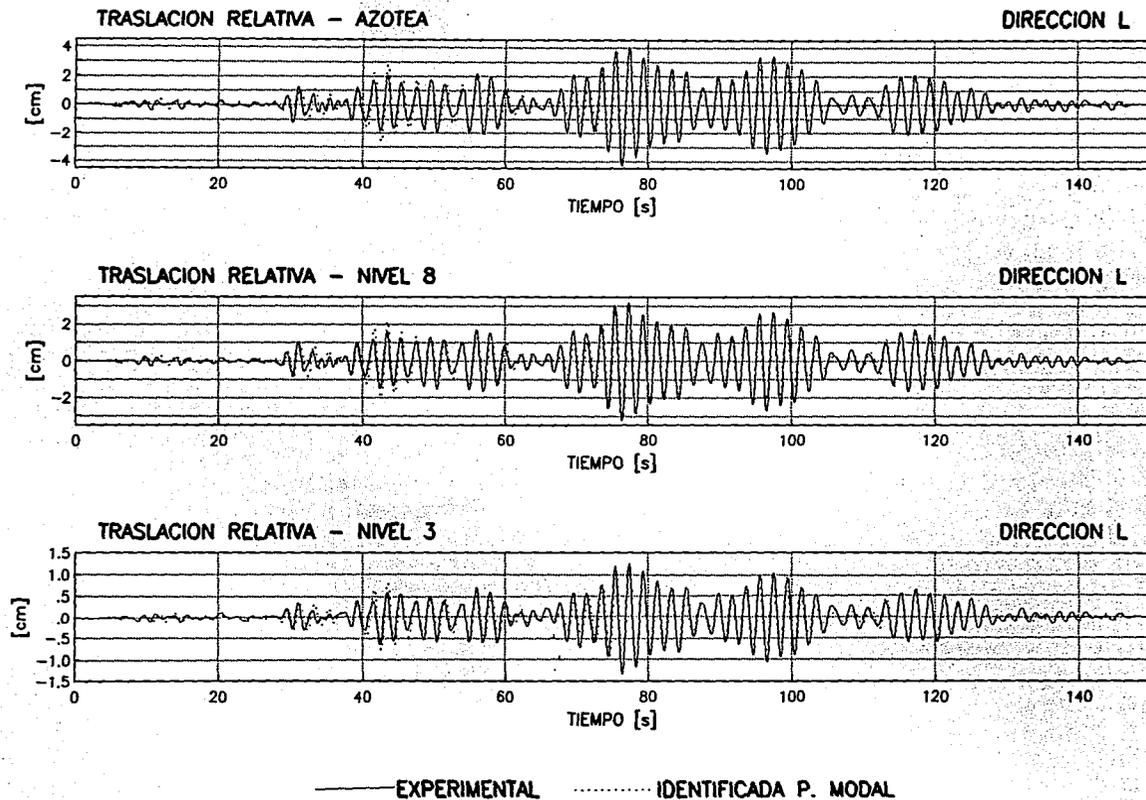


Fig 5.15a Comparación entre las señales experimentales con las identificadas por el modelo 3N6GAS2 utilizando el planteamiento modal

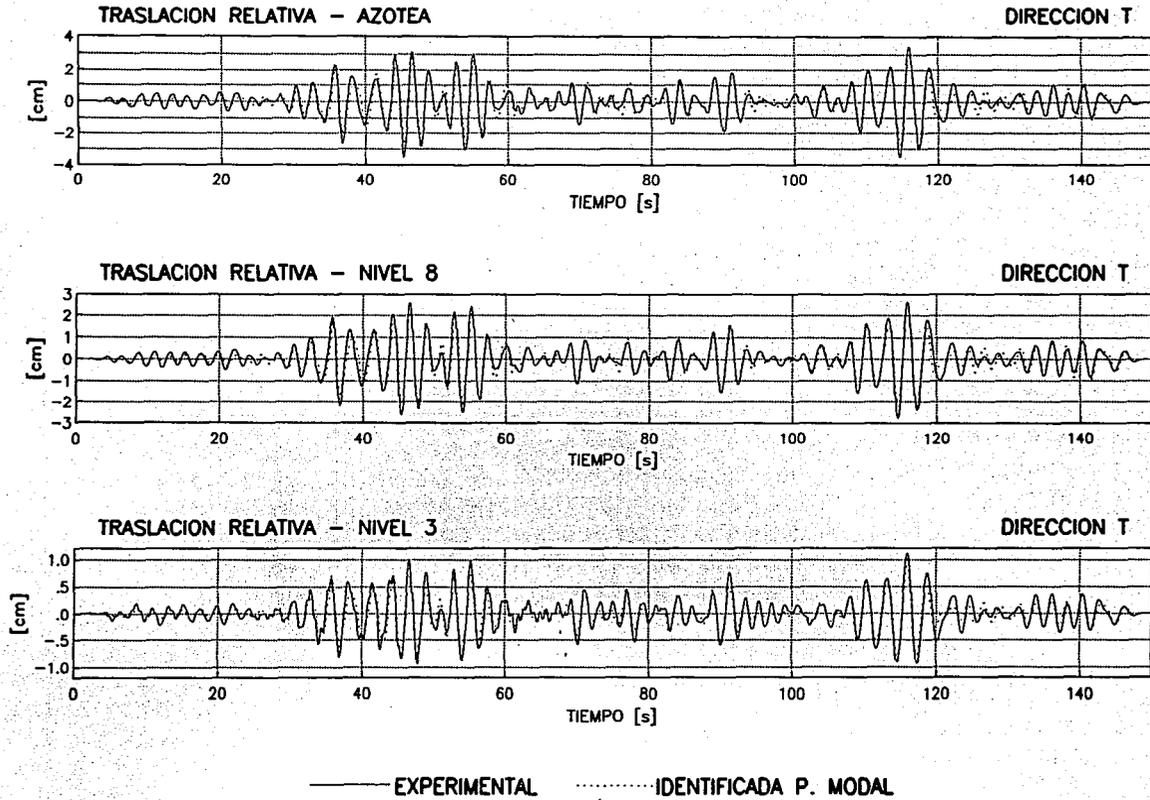
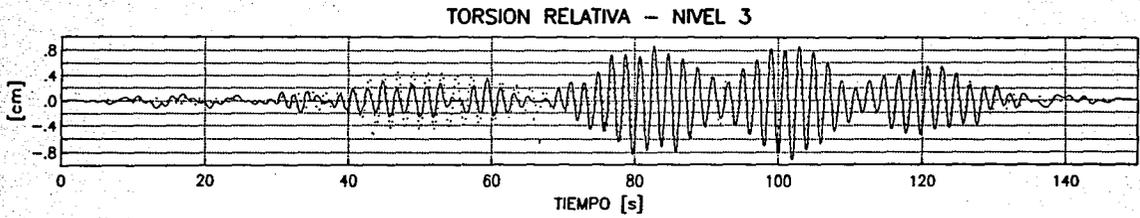
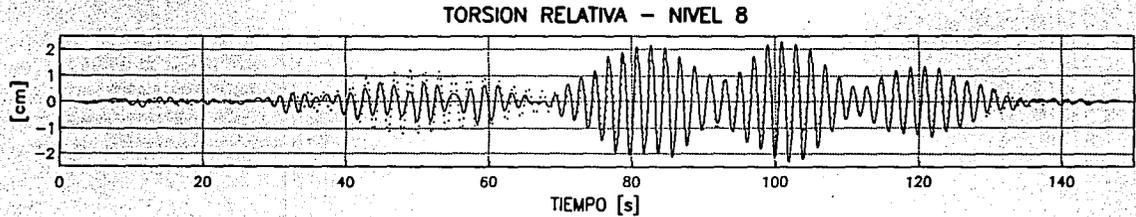
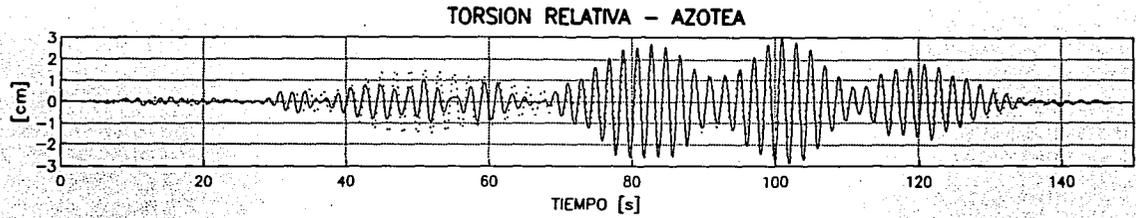


Fig 5.15b Comparación entre las señales experimentales con las identificadas por el modelo 3N6GAS2 utilizando el planteamiento modal



— EXPERIMENTAL IDENTIFICADA P. MODAL

Fig 5.15c Comparación entre las señales experimentales con las identificadas por el modelo 3N6GAS2 utilizando el planteamiento modal

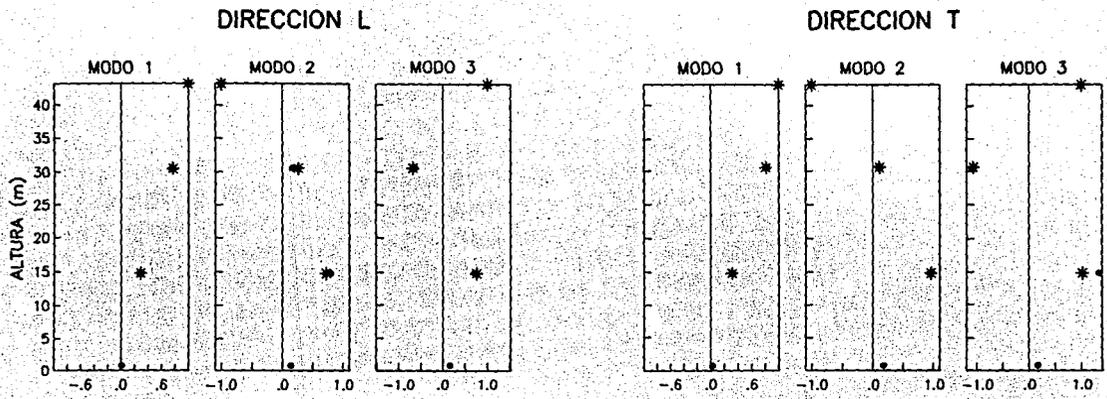


Fig 5.16 Formas modales de traslación (• - Experimentales, * - Identificadas con el planteamiento modal)

6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se desarrollaron modelos matemáticos simplificados de sistemas lineales e invariantes en el tiempo para ser aplicados con dos planteamientos de las ecuaciones de equilibrio dinámico y utilizados para la identificación de sistemas estructurales.

Se realizaron una serie de simulaciones con los modelos desarrollados, aplicando los dos planteamientos propuestos, y se evaluó su eficiencia para la identificación paramétrica de sistemas estructurales con base en el error de estimación, obtenido del ajuste entre las señales identificadas con respecto a las simuladas. El planteamiento de estado permite calcular explícitamente los parámetros de un sistema estructural, tales como rigidez y amortiguamiento, y sus características dinámicas, y el planteamiento modal, además de permitir calcular las características dinámicas del sistema, permite calcular las contribuciones de cada modo en la respuesta total, y con las formas modales, se podrían calcular las distorsiones y sus respectivos cortantes de entrepiso.

Los modelos más eficientes para el planteamiento modal son aquellos excitados por la traslación y el cabeceo de la base. Este planteamiento proporciona resultados válidos al ser aplicado a sistemas edificio-suelo con efectos mínimos de interacción.

Los planteamientos de estado y modal aplicados con modelos matemáticos que consideren comportamiento tridimensional, identifican adecuadamente las características dinámicas de sistemas estructurales que tengan componentes acoplados.

En el edificio Jal, se llevó a cabo la estimación de los parámetros y sus características dinámicas aplicando los dos planteamientos propuestos. Utilizando el planteamiento de estado se identificaron adecuadamente los parámetros del sistema estructural. Al identificar los parámetros del efecto de interacción suelo-estructura se recomienda hacer un análisis no paramétrico simplificado para tener una buena estimación inicial de los parámetros, y evitar así problemas de convergencia durante la identificación. Esto se debe a la pobre calidad de los registros experimentales, dado que el

movimiento relativo del sótano es pequeño con respecto a los de los niveles superiores del edificio, y el algoritmo de identificación aplicado no pondera adecuadamente este error en la estimación paramétrica, provocando discrepancias en los resultados. Utilizando ambos planteamientos se identificaron las características dinámicas globales del sistema estructural; sin embargo, con el planteamiento modal se logran identificar las características dinámicas de los modos superiores del sistema.

La identificación de sistemas paramétrica permite:

- **Hacer interpolaciones de las formas modales para obtener las respuestas en todos los niveles de una estructura, y así calcular los cortantes y las distorsiones de entrepiso.**
- **Proporcionar parámetros explícitos de rigidez y amortiguamiento tanto de la superestructura como del sistema suelo-estructura.**
- **Identificar parámetros modales de sistemas estructurales, tales como frecuencias, amortiguamientos y factores de participación modal.**
- **Desarrollar modelos simplificados de sistemas estructurales, y con ellos se pueden analizar comportamientos que sufre el sistema con diferentes tipos de registros sísmicos.**
- **Incluir modelos de comportamiento que tengan en cuenta la degradación de rigidez y resistencia que sufre un sistema estructural durante un evento sísmico.**

Las ventajas del análisis paramétrico con respecto al no paramétrico son:

- **Identifica adecuadamente amortiguamientos de modos superiores.**
- **Al sistematizar el proceso de identificación, permite identificar los parámetros y las características dinámicas más rápidamente.**
- **Analiza comportamiento no lineal de sistemas estructurales, incluyendo**

diferentes modelos de comportamiento histerético.

Finalmente, estas dos metodologías aplicadas para la identificación de sistemas proporcionan información muy importante para conocer el comportamiento real de sistemas estructurales durante eventos sísmicos. Se recomienda realizar identificación de sistemas analizando por tramos los registros experimentales con el propósito de calcular la variación que sufren las características dinámicas durante un evento sísmico. También se recomienda estudiar planteamientos recursivos de identificación de sistemas que tengan en cuenta intrínsecamente modelos de comportamiento estructural, considerando la degradación de rigidez y resistencia del sistema.

7. REFERENCIAS

- Anderson J. C., Miranda E., Bertero V. (1991)**, "Evaluation of the seismic performance of a thirty-story RC building", Informe No. UBC/EERC-91/16, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, July
- Bathe K. J. (1982)**, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Banan M., Hjeltnstad K. (1993)**, "Identification of structural systems from measured response", Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Structural Research Series No. 579
- Beck J. L. (1979)**, "Determining models of structure from earthquake records", Ph.D. Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena
- Beck J. L., Jennings P. C. (1980)**, "Structural Identification Using Lineal Models and Earthquake Records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, pp. 145-160
- Bekey G. A. (1970)**, "System identification - an introduction and a survey", Simulation Councils Inc., Vol. 5, No. 4, pp. 151-166, october
- Bendat J. S., Pierson A. G. (1986)**, "Random Data. Analysis and Measurement Procedures", Second Edition (Revised and Expanded), John Wiley and Sons, California, january
- Bielak J. (1975)**, "Modal Analysis for Building-Soil Interaction", Instituto de Ingeniería, UNAM, Publicación E17, julio
- Clough W. R., Penzien J. (1975)**, "Dynamics of Structures", Ed. Mc Graw Hill
- Davies P., Hammond J. K. (1984)**, "A comparison of Fourier and parametric methods for structural system identification", Trans. of the ASME, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 106, pp. 40-48, New York, N. Y.
- De Carlo R. (1989)**, "Linear Systems. A state variable approach with numerical implementation", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Dennis J. E., Schnabel, R. B. (1983)**, "Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- DiPasquale E., Cakmak A. S. (1988)**, "Identification of the serviceability limit state and direction of seismic structural damage", Technical Report NCEER-88-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N. Y.
- Durrani A. J., Mau S. T., AbouHashish A. A., Li Y. (1994)**, "Earthquake response of Flat-Slab Buildings", Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 3, march

- EERI (1990), "Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report", Earthquake Spectra, Supplement to Vol. 6, may**
- EERI (1994), "Northridge Earthquake January 17, 1994; Preliminary Reconnaissance Report", Earthquake Engineering Research Institute, march**
- EERI (1995), "The Hyogo-Ken Nanbu Earthquake January 17, 1995; Preliminary Reconnaissance Report", Earthquake Engineering Research Institute, february**
- Foutch D. A. (1978), "The vibrational characteristics of a twelve-story steel frame building", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6, pp. 265-294**
- Ghanem R., Shinozuka M. (1995), "Structural System Identification. I: Theory; II: Experimental Verification", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.121, No. 2, pp. 255-273, february**
- González R., Esteva L., Murià Vila D., Noguez F., Hernández L. (1993), "Identificación de parámetros estructurales en edificios instrumentados", Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 3524, patrocinado por DDF, diciembre**
- González Alcorta R., Hernández Cruz L., Esteva Maraboto L., Murià Vila D. (1994), "Desarrollo de una metodología para determinar parámetros estructurales con variación en el tiempo en edificios instrumentados. Aplicación al edificio Jal", Proyecto 4509, Instituto de Ingeniería UNAM, septiembre**
- González Alcorta R., Hernández Cruz L., Murià Vila D. (1994), "Análisis de la variación de parámetros estructurales con métodos de estimación paramétrica en un edificio instrumentado", Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Zacatecas, oct-nov**
- Goodwin G. C., Payne R. L. (1977), "Dynamic system identification: experiment design and data analysis", Academic Press, Inc., New York, N. Y.**
- Hart G., Yao J. (1977), "System Identification in Structural Dynamics", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, pp. 1089-1104, december**
- Hoshiya M., Saito C. (1984), "Structural Identification by Extended Kalman Filter", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 110, pp. 1757-1771, december**
- Hoshiya M., Sutoh A. (1992), "Extended Kalman Filter-Weighted Local Iteration Method for dynamic structural identification", Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Rotterdam, Balkema**
- Hoshiya M., Sutoh A. (1993), "Kalman Filter-Finite Element Method in Identification", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 119. No. 2, february**
- Hsia T. C. (1977), "System Identification", Lexington Books, D. C. Heath and Company, Lexington, Massachusetts**

- Imai H., Yun C. B., Maruyama O., Shinozuka M. (1989), "Fundamentals of system identification in structural dynamics", Technical Report NCEER-89-0008, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N. Y.**
- Iserman R., Baur U., Bamberger W., Kneppo P., Siebert H. (1974), "Comparison of six on-line identification and parameter estimation methods", Automatica, Vol. 10, pp. 81-103**
- Jazwinski A. H. (1970), "Stochastic processes and filtering theory", Academic Press, Inc., New York, N. Y.**
- Kalman R. E. (1960), "A New Approach to Linear Filtering And Prediction Problems", Journal of Basic Engineering, march**
- Kalman R. E., Bucy R. S. (1961), "New results in linear filtering and prediction theory", Journal of Basic Engineering, Vol. 83(D), pp. 95-108**
- Kashyap R. L. (1970), "Maximum likelihood identification of stochastic linear systems", IEEE Trans. on Automatic Control, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, N. Y., Vol. 15, No. 1, pp. 25-34**
- Kozin F., Natke H. G. (1986), "System identification techniques", Elsevier Science Publishers B.V., Structural Safety, No. 3, Amsterdam, pp. 269-316**
- Lee C. G. (1990), "Parameter estimations of structural dynamic systems using sequential prediction error method", PhD thesis, Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technological, Seoul, Korea**
- Li Y., Mau S. T. (1990), "A computer program for multiple input-multiple output system identification using building seismic records", University of Houston, Department of Civil and Environmental Engineering, Research Report UHCEE 90-07, august**
- Li Y., Mau S. T. (1991), "A case study of MIMO system identification applied to building seismic records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 1045-1064**
- Ljung L. (1986), "Frequency and time domain methods in system identification. Modelling identification and robust control", C. I. Byrnes and A. Lindquist, eds., pp 615-624**
- Ljung L. (1987), "System Identification - Theory for the User", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey**
- Luco J. E. (1980), "Soil-structure interaction and identification of structural models", Proc. 2nd ASCE Speciality Conference in Civil Engineering and Nuclear Power, Knoxville, Tennessee, Vol II, paper No. 10-1, pp. 10.1.1-10.1.31**
- Luco J. E., Trifunac M. D., Wong H. L. (1987), "On the apparent change in dynamic behavior of a nine-story reinforced concrete building", BSSA, Vol. 77, No. 6, pp. 1961-1983, december**

- Marquardt D. (1963), "An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters", SIAM Journal on Applied Mathematics, Vol. 11, pp. 431-441**
- Maruyama O., Yun C. B., Hoshiya M., Shinozuka M. (1989), "Program EXKAL2 for identification of structural dynamics systems", Technical Report NCEER-89-0014, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N. Y.**
- MATLAB. (1992), "High-Performance Numeric Computation and Visualization Software", The Math Works, august**
- Meli R., Murià-Vila D., Quaas R., Faccioli R., Paolucci R. (1994), "Study of site effects and building response in Mexico city during earthquakes", Final Report, Institute of Engineering, UNAM, Mexico, december**
- Miranda E., Bertero V. V. (1993), "Respuesta sísmica de un edificio instrumentado de 30 pisos durante el sismo de Loma Prieta", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco, octubre**
- Moreno Rubín de Celis S., Murià Vila D., González Alcorta R. (1994), "Análisis de la respuesta estructural del edificio Jal ante sismos intensos", Proyecto 4521, Instituto de Ingeniería, UNAM, México**
- Murià Vila D., González Alcorta R., Espinosa Aranda J. M. (1993), "Efectos de Interacción Suelo-Estructura en la Respuesta Sísmica de un Edificio Instrumentado", Series del Instituto de Ingeniería, No. 555, UNAM, enero**
- Murià Vila D., Moreno Rubín de Celis S. (1993), "Identificación de las propiedades dinámicas mediante vibración ambiental. El edificio Jalapa", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco, octubre**
- Murià Vila D., Meli R. (1994), "Respuesta sísmica de un edificio altos instrumentado en la ciudad de México", Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Zacatecas, oct-nov**
- Murià Vila D., Pérez Roldán J. H., Rubín de Celis S. M. (1994), "Efectos de interacción suelo-estructura en un edificio con cimentación profunda", Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Zacatecas, oct-nov**
- Murià Vila D., Pérez Roldán J., Rubín de Celis S., Ramírez R, Toro A (1995), "Procesamiento y análisis de los registros sísmicos del edificio Jal obtenidos entre 1993 y 1994", Informe interno en proceso, Instituto de Ingeniería, UNAM**
- Murià Vila D., Rubín de Celis S., Toro A (1995), "Monitoreo de las propiedades dinámicas del edificio Jal", Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, Patrocinado por el DDF**
- Natke H. G. (1990), "Recent trends in system identification", Structural Dynamics, Kratzig et al., pp. 283-289**
- Newmark N. M. (1959), "A Method of Computation for Structural Dynamics", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE 85, july**

- Paolucci R. (1993), "Soil-structure interaction effects on an instrumented building in Mexico City", European Earthquake Engineering, october**
- Pérez Roldán J. H. (1995), "Desarrollo de un modelo matemático tridimensional con efectos de interacción suelo-estructura para identificación de sistemas", Trabajo de Investigación II, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, enero**
- Quaas R., Almora D. (1993), "Instrumentación sísmica del edificio Jalapa. Resumen de la operación y registro de datos durante 1993", Instituto de Ingeniería, Proyecto 2561, enero**
- Rosenblueth E., Meli R. (1986), "The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico City", Concrete International, Design and Construction, Vol.8, No. 5, may**
- Safak E. (1989), "Adaptive Modeling, Identification, and Control of Dynamic Structural Systems. I: Theory; II: Applications", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 115, No. 11, pp. 2386-2426**
- Safak E. (1993), "Response of a 42-story steelframe building to the Ms=7.1 Loma Prieta earthquake", Engineering Structures, Vol. 15, No. 6, pp. 403-421**
- Saridis G. N. (1974), "Comparison of six on-line identification algorithms", Automatica, Vol. 10, pp. 69-79**
- Tanaka T., Yoshizawa S., Osawa Y., Morishita T. (1969), "Period and damping in actual buildings during earthquakes", Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 47, september, pp. 1073-1092**
- TGC Geotécnia. (1992), "Exploración e instalación de acelerómetros en Jalapa 12 y 15 Col. Roma, México DF", Informe TGC 92-1375, noviembre**
- Torkamani M. A., Hart G. H. (1978), "System identification: Impulse response functions", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 104, pp. 1147-1158**
- Udwadia F. E., Marmarelis P. Z. (1976), "The identification of building structural systems, I. The linear case; II. The nonlinear case", Bulletin of Seismic Society of America, Vol. 66, pp. 125-151; pp.153-171**
- Werner S. D., Beck J. L., Levine M. B. (1987), "Seismic response evaluation of Meloland Road Overpass using 1979 Imperial Valley earthquake records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 15, pp. 249-274**
- Yun C. B., Shinozuka M. (1980), "Identification of nonlinear structural dynamic systems", Journal of Structural Mechanics, Vol. 8, No. 2, pp. 187-203**
- Yun C. B., Lee C. G., Cho H. N. (1991), "Identification of structural dynamic systems by sequential prediction error method", Proc., 1st International Conference on Computational Stochastic Mechanics, Corfu, Greece**

NOMENCLATURA

M1GL Modelo de un grado de libertad

m	Masa del sistema estructural
k, c	Rigidez y amortiguamiento del sistema estructural
X	Respuesta traslacional del sistema estructural
\ddot{X}_g	Aceleración del terreno

M3GL-2D Modelo de tres grados de libertad plano

h	Altura del sistema estructural
m_e	Masa de la superestructura
m_o	Masa de la cimentación
J	Momento polar de inercia de masa de la cimentación
K_e, C_e	Rigidez y amortiguamiento de la estructura
K_x, C_x	Rigidez y amortiguamiento traslacional de la base
K_r, C_r	Rigidez y amortiguamiento rotacional de cabeceo de la base
X_e	Respuesta traslacional de la estructura
X_o	Respuesta traslacional de la base
ϕ	Respuesta rotacional de cabeceo de la base
\ddot{X}_g	Aceleración del terreno

M3GL-3D Modelo de tres grados de libertad tridimensional

m	Masa traslacional del sistema
J	Momento polar de inercia de masa del sistema
K_x, C_x	Rigidez y amortiguamiento del sistema en la dirección X
K_y, C_y	Rigidez y amortiguamiento del sistema en la dirección Y
K_θ, C_θ	Rigidez y amortiguamiento en la dirección torsional del sistema
e_x, e_y	Excentricidad entre los centros de masa y rigidez, dirección X y Y
X, Y	Respuesta traslacional del sistema, dirección X y Y
θ	Respuesta torsional del sistema

M5GL-2D	Modelo de cinco grados de libertad plano
h_i	Alturas de las masas ($i = 1, 2, 3$)
m_i	Masas de la estructura ($i = 1, 2, 3$)
m_o	Masa de la cimentación
J	Momento polar de inercia de masa de la cimentación
K_i, C_i	Rigideces y amortiguamientos de la estructura ($i = 1, 2, 3$)
K_x, C_x	Rigidez y amortiguamiento traslacional de la base
K_r, C_r	Rigidez y amortiguamiento rotacional de cabeceo de la base
X_{oi}	Respuestas traslacionales de la estructura ($i = 1, 2, 3$)
X_o	Respuesta traslacional de la base
ϕ	Respuesta rotacional de cabeceo de la base
\ddot{X}_g	Aceleración del terreno

M7GL	Modelo de siete grados de libertad tridimensional
h	Altura del sistema
m	Masa de la superestructura
m_o	Masa de la cimentación
J_T	Momento polar de inercia de masa de la superestructura
$J_{X ISB}$	Momento polar de inercia de masa de la cimentación en dir. X
$J_{Y ISB}$	Momento polar de inercia de masa de la cimentación en dir. Y
K_x, C_x	Rigidez y amortiguamiento de la estructura en la dirección X
K_y, C_y	Rigidez y amortiguamiento de la estructura en la dirección Y
K_θ, C_θ	Rigidez y amortiguamiento en la dirección torsional de la superestructura
e_x, e_y	Excentricidad entre los centros de masa y rigidez, dirección X y Y
K_{ox}, C_{ox}	Rigidez y amortiguamiento traslacional de la base en dirección X
K_{rx}, C_{rx}	Rigidez y amortiguamiento rotacional de cabeceo de la base en dirección X
K_{oy}, C_{oy}	Rigidez y amortiguamiento traslacional de la base en dirección Y
K_{ry}, C_{ry}	Rigidez y amortiguamiento rotacional de cabeceo de la base en dirección Y
X, Y	Respuesta relativa de la azotea con respecto a la cimentación, dir. X y Y, es decir, $X = X_o + X_o + \phi_x h$, $Y = Y_o + Y_o + \phi_y h$

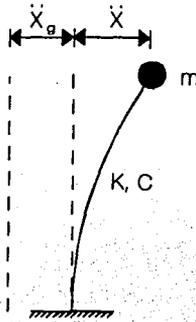
θ	Respuesta torsional de la azotea en su plano
X_o, Y_o	Respuesta traslacional de la base en dirección X y Y
ϕ_x, ϕ_y	Respuesta rotacional de cabeceo de la base en dirección X y Y
\ddot{X}_g, \ddot{Y}_g	Aceleración del terreno en dirección X y Y

APÉNDICE A

PLANTEAMIENTO DE ESTADO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

- Modelo de un grado de libertad (M1GL)

Idealización del modelo:



Ecuación de equilibrio:

$$m \ddot{X} + C \dot{X} + K X = -m \ddot{X}_g$$

Planteamiento de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \ddot{X}_g$$

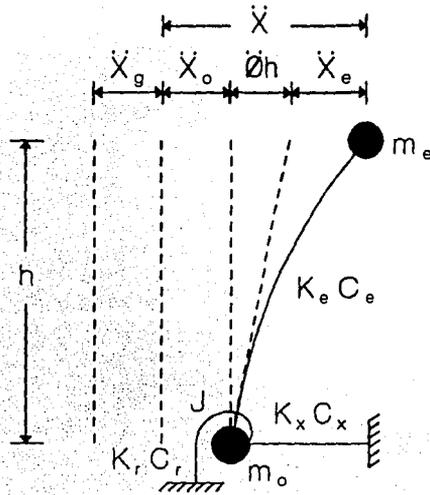
donde:

$$X_1 = X$$

$$X_2 = \dot{X}$$

Modelo de tres grados de libertad plano (M3GL-2D)

Idealización del modelo:



Ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{bmatrix} m_o & 0 & 0 \\ 0 & m_o & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{X}_o \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_o & -C_o & -C_o h \\ -C_o & C_x + C_o & C_o h \\ -C_o h & C_o h & C_x + C_o h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}_o \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_o & -K_o & -K_o h \\ -K_o & K_x + K_o & K_o h \\ -K_o h & K_o h & K_x + K_o h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_o \\ \phi \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_o \\ m_o \\ 0 \end{bmatrix}$$

Planteamiento de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_e/m_e & K_e/m_e & K_e h/m_e & -C_e/m_e & C_e/m_e & C_e h/m_e \\ K_e/m_o & -(K_x+K_e)/m_o & -K_e h/m_o & C_e/m_o & -(C_x+C_e)/m_o & -C_e h/m_o \\ K_e h/J & -K_e h/J & -(K_r+K_e h^2)/J & C_e h/J & -C_e h/J & -(C_r+C_e h^2)/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

donde:

$$X_1 = X$$

$$X_2 = X_o$$

$$X_3 = \phi$$

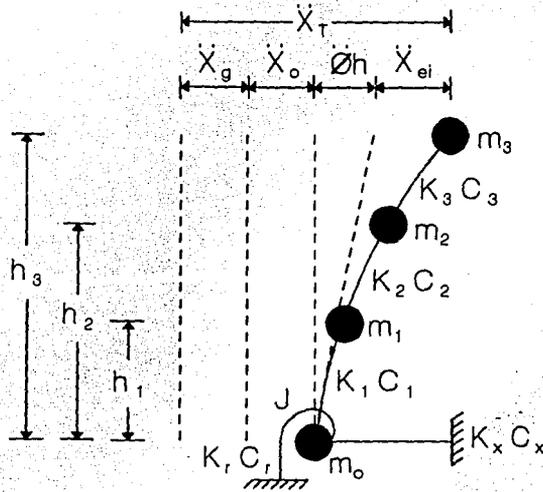
$$X_4 = \dot{X}$$

$$X_5 = \dot{X}_o$$

$$X_6 = \phi$$

- **Modelo de cinco grados de libertad plano (M5GL-2D)**

Idealización del modelo asumiendo una estructura de cortante:



Ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_{03} \\ \ddot{Y}_{02} \\ \ddot{X}_{01} \\ \ddot{X}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} C_3 & -C_3 & 0 & 0 & -C_3\Delta_3 \\ -C_3 & C_3 + C_2 & -C_2 & 0 & C_3\Delta_3 - C_2\Delta_2 \\ 0 & -C_2 & C_2 + C_1 & -C_1 & C_2\Delta_2 - C_1\Delta_1 \\ 0 & 0 & -C_1 & C_1 + C_x & C_1\Delta_1 \\ -C_3\Delta_3 & C_3\Delta_3 - C_2\Delta_2 & C_2\Delta_2 - C_1\Delta_1 & C_1\Delta_1 & C_x + \sum_{i=1}^3 C_i (h_i - h_{i-1})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_{03} \\ \dot{X}_{02} \\ \dot{X}_{01} \\ \dot{X}_0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} K_3 & -K_3 & 0 & 0 & -K_3\Delta_3 \\ -K_3 & K_3 + K_2 & -K_2 & 0 & K_3\Delta_3 - K_2\Delta_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_1 & -K_1 & K_2\Delta_2 - K_1\Delta_1 \\ 0 & 0 & -K_1 & K_1 + K_x & K_1\Delta_1 \\ -K_3\Delta_3 & K_3\Delta_3 - K_2\Delta_2 & K_2\Delta_2 - K_1\Delta_1 & K_1\Delta_1 & K_x + \sum_{i=1}^3 K_i (h_i - h_{i-1})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{03} \\ X_{02} \\ X_{01} \\ X_0 \\ \phi \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_3 \\ m_2 \\ m_1 \\ m_0 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

donde:

$$\Delta_3 = h_3 - h_2$$

$$\Delta_2 = h_2 - h_1$$

$$\Delta_1 = h_1$$

Planteamiento de Estado

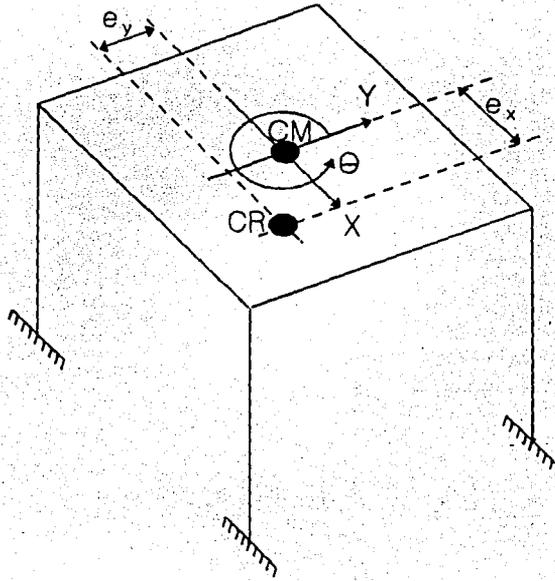
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_1}{m_3} & \frac{K_1}{m_3} & 0 & 0 & \frac{K_1 \Delta_1}{m_3} & -\frac{C_1}{m_3} & \frac{C_1}{m_3} & 0 & 0 & \frac{C_1 \Delta_2}{m_3} \\ \frac{K_1}{m_1} & -\frac{K_1 + K_2}{m_1} & \frac{K_2}{m_1} & 0 & -\frac{K_1 \Delta_1 + K_2 \Delta_2}{m_1} & \frac{C_1}{m_1} & -\frac{C_1 + C_2}{m_1} & \frac{C_2}{m_1} & 0 & -\frac{C_1 \Delta_1 + C_2 \Delta_2}{m_1} \\ 0 & \frac{K_2}{m_1} & -\frac{K_2 + K_1}{m_1} & \frac{K_1}{m_1} & -\frac{K_2 \Delta_1 + K_1 \Delta_2}{m_1} & 0 & \frac{C_1}{m_1} & -\frac{C_1 + C_2}{m_1} & \frac{C_2}{m_1} & -\frac{C_2 \Delta_1 + C_1 \Delta_2}{m_1} \\ 0 & 0 & \frac{K_1}{m_0} & -\frac{K_1 + K_2}{m_0} & -\frac{K_1 \Delta_1}{m_0} & 0 & 0 & \frac{C_1}{m_0} & -\frac{C_1 + C_2}{m_0} & -\frac{C_1 \Delta_1}{m_0} \\ \frac{K_1 \Delta_1}{J} & -\frac{K_1 \Delta_1 + K_2 \Delta_2}{J} & -\frac{K_2 \Delta_1 + K_1 \Delta_2}{J} & -\frac{K_1 \Delta_1}{J} & -\frac{K_2 + \sum_{i=1}^2 K_i \Delta_i^2}{J} & \frac{C_1 \Delta_1}{J} & \frac{C_1 \Delta_1 + C_2 \Delta_2}{J} & -\frac{C_2 \Delta_1 + C_1 \Delta_2}{J} & -\frac{C_1 \Delta_1}{J} & -\frac{C_2 + \sum_{i=1}^2 C_i \Delta_i^2}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{x}_e$$

donde:

- $X_1 = X_{e3}$
- $X_2 = X_{e2}$
- $X_3 = X_{e1}$
- $X_4 = X_0$
- $X_5 = \phi$
- $X_6 = \dot{X}_{e3}$
- $X_7 = \dot{X}_{e2}$
- $X_8 = \dot{X}_{e1}$
- $X_9 = \dot{X}_0$
- $X_{10} = \dot{\phi}$

- Modelo de tres grados de libertad tridimensional (M3GL-3D)

Idealización del modelo:



Ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x & 0 & C_x e_y \\ 0 & C_y & C_y e_x \\ C_x e_y & C_y e_x & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 & K_x e_y \\ 0 & K_y & K_y e_x \\ K_x e_y & K_y e_x & K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m \dot{X}_g \\ m \dot{Y}_g \\ 0 \end{bmatrix}$$

Planteamiento de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_x/m & 0 & -K_x e_y/m & -C_x/m & 0 & -C_x e_y/m \\ 0 & -K_y/m & -K_y e_x/m & 0 & -C_y/m & -C_y e_x/m \\ -K_x e_y/J & -K_y e_x/J & -K_\theta/J & -C_x e_y/J & -C_y e_x/J & -C_\theta/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\ddot{X}_g \\ -\ddot{Y}_g \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde:

$$X_1 = X$$

$$X_2 = Y$$

$$X_3 = \theta$$

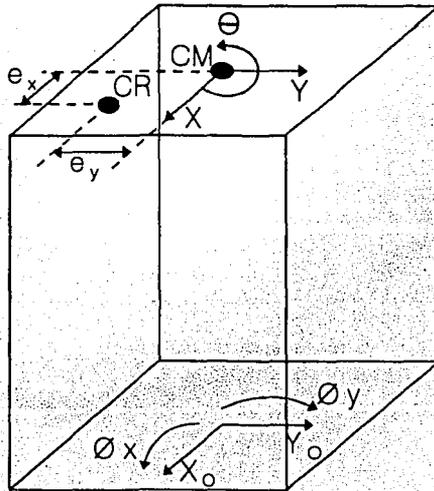
$$X_4 = \dot{X}$$

$$X_5 = \dot{Y}$$

$$X_6 = \dot{\theta}$$

- **Modelo de siete grados de libertad tridimensional (M7GL)**

Idealización del modelo:



Ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{X\text{ ISE}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{Y\text{ ISE}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{X}_0 \\ \phi_x \\ \ddot{Y}_0 \\ \phi_y \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} C_x & 0 & C_x e_y & -C_x & -C_x h & 0 & 0 \\ 0 & C_y & C_y e_x & 0 & 0 & -C_y & -C_y h \\ C_x e_y & C_y e_x & C_T + C_x e_y^2 + C_y e_x^2 & -C_x e_y & -C_x h e_y & -C_y e_x & -C_y h e_x \\ -C_x & 0 & -C_x e_y & C_x + C_{0x} & C_x h & 0 & 0 \\ -C_x h & 0 & -C_x e_y h & C_x h & C_x h^2 + C_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & -C_y & -C_y e_x & 0 & 0 & C_y + C_{0y} & C_y h \\ 0 & -C_y h & -C_y e_x h & 0 & 0 & C_y h & C_y h^2 + C_{ry} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{X}_0 \\ \phi_x \\ \dot{Y}_0 \\ \phi_y \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} K_x & 0 & K_x e_y & -K_x & -K_x h & 0 & 0 \\ 0 & K_y & K_y e_x & 0 & 0 & -K_y & -K_y h \\ K_x e_y & K_y e_x & K_T + K_x e_y^2 + K_y e_x^2 & -K_x e_y & -K_x h e_y & -K_y e_x & -K_y h e_x \\ -K_x & 0 & -K_x e_y & K_x + K_{0x} & K_x h & 0 & 0 \\ -K_x h & 0 & -K_x e_y h & K_x h & K_x h^2 + K_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & -K_y & -K_y e_x & 0 & 0 & K_y + K_{0y} & K_y h \\ 0 & -K_y h & -K_y e_x h & 0 & 0 & K_y h & K_y h^2 + K_{ry} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ X_0 \\ \phi_x \\ Y_0 \\ \phi_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -m\ddot{X}_g \\ -m\ddot{Y}_g \\ 0 \\ -m_0\ddot{X}_g \\ 0 \\ -m_0\ddot{Y}_g \\ 0 \end{bmatrix}$$

Planteamiento de Estado

$$\begin{matrix}
 \dot{x}_1 \\
 \dot{x}_2 \\
 \dot{x}_3 \\
 \dot{x}_4 \\
 \dot{x}_5 \\
 \dot{x}_6 \\
 \dot{x}_7 \\
 \dot{x}_8 \\
 \dot{x}_9 \\
 \dot{x}_{10} \\
 \dot{x}_{11} \\
 \dot{x}_{12} \\
 \dot{x}_{13} \\
 \dot{x}_{14}
 \end{matrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 -\frac{K_x}{m} & 0 & -\frac{K_x \phi_x}{m} & \frac{K_x}{m} & \frac{K_x h}{m} & 0 & 0 & -\frac{C_x}{m} & 0 & -\frac{C_x \phi_x}{m} & \frac{C_x}{m} & \frac{C_x h}{m} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{K_y}{m} & -\frac{K_y \phi_y}{m} & 0 & 0 & \frac{K_y}{m} & \frac{K_y h}{m} & 0 & -\frac{C_y}{m} & -\frac{C_y \phi_y}{m} & 0 & 0 & \frac{C_y}{m} & \frac{C_y h}{m} & 0 \\
 \frac{K_x \phi_x}{J_x} & \frac{K_x \phi_y}{J_x} & \frac{K_x + K_x \phi_x^2 + K_x \phi_y^2}{J_x} & \frac{K_x \phi_x}{J_x} & \frac{K_x h \phi_x}{J_x} & \frac{K_x \phi_x}{J_x} & \frac{K_x h \phi_y}{J_x} & \frac{C_x \phi_x}{J_x} & \frac{C_x \phi_y}{J_x} & \frac{C_x + C_x \phi_x^2 + C_x \phi_y^2}{J_x} & \frac{C_x \phi_x}{J_x} & \frac{C_x h \phi_x}{J_x} & \frac{C_x \phi_y}{J_x} & \frac{C_x h \phi_y}{J_x} & \frac{C_x \phi_x h}{J_x} \\
 \frac{K_y}{m_0} & 0 & \frac{K_y \phi_x}{m_0} & -\frac{K_y + K_{xx}}{m_0} & -\frac{K_y h}{m_0} & 0 & 0 & \frac{C_y}{m_0} & 0 & \frac{C_y \phi_x}{m_0} & -\frac{C_y + C_{xx}}{m_0} & -\frac{C_y h}{m_0} & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{K_x h}{J_x 120} & 0 & \frac{K_x \phi_x h}{J_x 120} & \frac{K_x h}{J_x 120} & \frac{K_x h^2 + K_{xx}}{J_x 120} & 0 & 0 & \frac{C_x h}{J_x 120} & 0 & \frac{C_x \phi_x h}{J_x 120} & -\frac{C_x h}{J_x 120} & \frac{C_x h^2 + C_{xx}}{J_x 120} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{K_y}{m_0} & \frac{K_y \phi_x}{m_0} & 0 & 0 & -\frac{K_y + K_{yy}}{m_0} & -\frac{K_y h}{m_0} & 0 & \frac{C_y}{m_0} & \frac{C_y \phi_x}{m_0} & 0 & 0 & \frac{C_y + C_{yy}}{m_0} & \frac{C_y h}{m_0} & 0 \\
 0 & \frac{K_y h}{J_y 120} & \frac{K_y \phi_x h}{J_y 120} & 0 & 0 & \frac{K_y h}{J_y 120} & \frac{K_y h^2 + K_{yy}}{J_y 120} & 0 & \frac{C_y h}{J_y 120} & \frac{C_y \phi_x h}{J_y 120} & 0 & 0 & \frac{C_y h}{J_y 120} & \frac{C_y h^2 + C_{yy}}{J_y 120} & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3 \\
 x_4 \\
 x_5 \\
 x_6 \\
 x_7 \\
 x_8 \\
 x_9 \\
 x_{10} \\
 x_{11} \\
 x_{12} \\
 x_{13} \\
 x_{14}
 \end{matrix}
 +
 \begin{matrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{matrix}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= X & X_8 &= \dot{X} \\
 X_2 &= Y & X_9 &= \dot{Y} \\
 X_3 &= \theta & X_{10} &= \dot{\theta} \\
 X_4 &= X_0 & X_{11} &= \dot{X}_0 \\
 X_5 &= \phi_x & X_{12} &= \dot{\phi}_x \\
 X_6 &= Y_0 & X_{13} &= \dot{Y}_0 \\
 X_7 &= \phi_y & X_{14} &= \dot{\phi}_y
 \end{aligned}$$

APÉNDICE B

EFICIENCIA DEL MODELO DE SIETE GRADOS DE LIBERTAD TRIDIMENSIONAL

El modelo de siete grados de libertad (M7GL) es el modelo más complejo de todos los desarrollados con el planteamiento de estado para la identificación de sistemas y es el que tiene más problemas de convergencia debido a varias razones que se explican en este apéndice, por lo tanto se le dió una mayor importancia en las simulaciones realizadas. Los otros modelos tienen muy pocos problemas y casi siempre convergen a soluciones racionales.

El planteamiento general de las ecuaciones de equilibrio dinámico del M7GL se puede apreciar detalladamente en otro trabajo (Pérez, 1995).

Se realizaron una serie de estrategias para evaluar la eficiencia del M7GL y se obtuvieron los siguientes resultados:

Inicialmente se analizó la convergencia del M7GL con respecto a los parámetros de la superestructura y los relacionados con el efecto de interacción suelo-estructura, para esto se llevaron a cabo tres estrategias fundamentalmente:

- a) Cuando se liberan todos los parámetros estructurales y se alejan ligeramente de los valores reales, el M7GL identifica adecuadamente los parámetros simulados, sin embargo, a medida que los parámetros a identificar se alejan más de los valores reales, el M7GL empieza a tener problemas de convergencia debido principalmente a que los parámetros relacionados con el efecto de interacción suelo-estructura son muy sensibles a causa de la mínima amplitud que tienen los registros de la base con respecto a los de la azotea.
- b) Cuando se fijan los parámetros relacionados a los efectos de interacción suelo-estructura y se liberan y varían los relacionados a la superestructura, este M7GL ajusta adecuadamente las respuestas simuladas e identifica bien los

parámetros de la superestructura. En esta etapa se hicieron gran cantidad de simulaciones y todas convergieron a valores razonables. Este M7GL cuando se le fijan los parámetros relacionados al efecto de interacción suelo-estructura es equivalente al M3GL-3D, el cual es un modelo muy eficiente y que representa adecuadamente el comportamiento global del sistema estructural (González et al., 1994).

- c) Cuando se fijan los parámetros relacionados con la superestructura y se dejan libres y varían los del efecto de interacción suelo-estructura, el M7GL es muy sensible a pequeñas variaciones de los parámetros y tiene demasiados problemas para converger a soluciones razonables.

Se analizó el M7GL simétrico y desacoplado, es decir, se le dieron parámetros iguales en ambas direcciones ortogonales y excentricidad cero entre los centros de masa y rigidez. Las respuestas en ambas direcciones fueron iguales, por lo tanto, el M7GL con estas características es equivalente al M3GL-2D, y para ver esta equivalencia, se alimentó el M3GL-2D con las respuestas simuladas por el M7GL. El M3GL-2D identificó adecuadamente los parámetros asociados a la superestructura y los asociados al efecto de interacción suelo-estructura y las respuestas identificadas con el M3GL-2D se encimaron con las simuladas por el M7GL. Sin embargo, a veces el M3GL-2D no converge inmediatamente cuando se varían los parámetros y para superar este inconveniente se llevó a cabo la siguiente estrategia: primero, se fijaron los parámetros de amortiguamiento y se liberaron los de rigidez, luego se fijaron los parámetros de rigidez y se liberaron los de amortiguamiento, y finalmente, al M7GL se le dieron como valores iniciales todos los parámetros identificados en los dos pasos anteriores, y así el M3GL-2D convergió satisfactoriamente.

Cabe resaltar que para realizar estas simulaciones se utilizaron varios tipos de excitaciones con diferentes contenidos frecuenciales, y para asegurar la convergencia de ambos modelos (M3GL-2D y M7GL), la señal de excitación debe tener un contenido frecuencial tal que excite las frecuencias asociadas a todos los grados de libertad; si por el contrario, la señal de excitación es pobre en frecuencia y no logra excitar algunas frecuencias del modelo, éste difícilmente convergerá a una solución racional.

Además, se realizaron pruebas de sensibilidad paramétrica con los modelos M7GL y M3GL-2D, y se llegó a la conclusión que los parámetros más sensibles para la convergencia de los modelos, son los relacionados con el efecto de interacción suelo-estructura y que están asociados a altos componentes frecuenciales.

También se realizó un estudio con los parámetros de rigidez y amortiguamiento del M7GL, y se llegó a la conclusión que cuando se varían los parámetros de amortiguamiento y se dejan fijos los de rigidez, se observa un mejor ajuste entre las respuestas simuladas con las identificadas que cuando se varían los de rigidez y se dejan constantes los de amortiguamiento (Pérez, 1995), por lo tanto, los parámetros de amortiguamiento son poco sensibles a la convergencia del M7GL.

Se realizaron simulaciones con varios tipos de estructuras que tuvieran diferentes períodos y en casi todas convergió a valores razonables, excepto cuando se utilizaron parámetros asociados al efecto de interacción suelo-estructura relacionados con suelos exageradamente flexibles; en este caso el M7GL converge bien en todos los grados de libertad excepto en el grado de libertad de torsión de la superestructura, por lo tanto el M7GL no se debe utilizar para reproducir respuestas torsionales en suelos demasiados blandos, es decir, suelos con módulos de cortante menores a 100 t/m².

Se realizó un análisis con el M7GL para ver la influencia que tiene la variación aleatoria de sus parámetros en la convergencia del modelo. Los parámetros se seleccionaron aleatoriamente siguiendo una distribución gaussiana, cada parámetro se calcula de la siguiente forma:

$$\theta_s = \theta_r + (\sigma_\theta \theta_r) A_i$$

donde:

- θ_s Parámetro inicial
- θ_r Parámetro real
- σ_θ Desviación estándar seleccionada
- A_i Variable aleatoria gaussiana (media cero y varianza unitaria).

Se llevaron a cabo 30 simulaciones con una desviación estándar del 10 % para seleccionar todos los parámetros, y de las simulaciones realizadas convergieron

apenas 13, lo que equivale a una eficiencia de un 43 %. Analizando los resultados se concluye que el M7GL no es tan efectivo cuando se liberan y varían aleatoriamente todos sus parámetros, y su uso práctico se limita a cuando se tiene una idea muy cercana de los valores reales de sus parámetros.

Se analizó la influencia del diezmado de las señales utilizadas en el análisis paramétrico con el M7GL con el fin de evitar problemas de distorsión, tanto en frecuencia como en amplitud. El diezmado depende del contenido frecuencial necesario de las señales para poder excitar todos los grados de libertad del modelo matemático, es decir, se debe tener presente cual es el período mínimo del sistema estructural a identificar en el análisis paramétrico ($T_{mín}$), y se recomienda que el incremento máximo de tiempo (Δt) que se puede utilizar, para que el análisis sea estable, es del orden de $T_{mín}/10$. En adición, antes de realizar el diezmado a los registros de aceleración, se recomienda aplicarles un filtro pasa bajas, para eliminar las frecuencias por encima de la nueva frecuencia de Nyquist, y evitar así, problemas de *aliasing*.

En la siguiente tabla se resume los análisis realizados con el M7GL:

FRECUENCIA (Hz)	INCREMENTO DE TIEMPO (s)				
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
10	C	C	C	C	C
15	C	C	C	C	NC
20	C	C	C	NC	NC
25	C	C	NC	NC	NC
30	C	C	NC	NC	NC

C = Converge

NC = No converge

La frecuencia máxima que puede alcanzar el espectro de Fourier es la frecuencia de Nyquist, $f_o = 1/(2 \Delta t)$, por lo tanto para los incrementos de tiempo estudiados, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 y 0.05 s, sus respectivas frecuencias de Nyquist son 50, 25, 16.67, 12.5 y 10 Hz. En la tabla de los análisis realizados se puede observar que cuando se utiliza incrementos de tiempo menores de 0.02 s, el modelo siempre converge adecuadamente, sin embargo a medida que el incremento de tiempo aumenta, el M7GL empieza a tener problemas de convergencia debido a la pérdida del contenido frecuencial en la señal de entrada necesario para excitar todos los grados de libertad del M7GL.