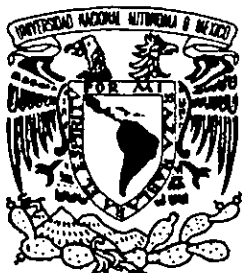


01161



---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

***EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE  
MODELOS DE EDIFICIOS  
- MÉTODO PSEUDODINÁMICO -***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
( Estructuras )**

**Presenta:**

*Ing. Adrián Ricardo López Cervantes*

**Dirigida por:**

*Dr. Gustavo Ayala Milian*

Ciudad Universitaria

Marzo del 2000

277108



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

A mis padres,  
*José Cruz y Ma. Guadalupe*  
porque siempre han creído en mí  
pero sobre todo por el apoyo  
y cariño incondicional  
que me han brindado toda la vida

A mi hermano,  
*Oscar*  
por su apoyo y solidaridad.

A  
*César, Puty, Cesarín y Karlita*  
por el cariño que siempre me han brindado.

A mi novia,  
*Anabel*  
por su amor, comprensión y paciencia,  
por compartir conmigo los buenos y malos momentos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento muy especial al Dr. Gustavo Ayala Milian, por haber dirigido el presente trabajo con gran empeño y entusiasmo, por su paciencia y, por el apoyo que siempre me brindó para el logro de mis metas y objetivos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el patrocinio del proyecto No.25755-A, titulado "Desarrollo de métodos analíticos y experimentales para la evaluación del comportamiento sísmico de edificios" dentro del cual fue desarrollado el presente trabajo.

Al Instituto de Ingeniería, por haberme permitido complementar mis estudios con la colaboración en parte de una investigación que es desarrollada dentro de esta institución.

A la Dirección General de Intercambio Académico por la beca que durante dos años me fue otorgada.

A todos los catedráticos de la DEPMI por haber compartido su conocimiento.

A la UASLP y, en especial al Ing. Jorge Pérez, por el apoyo que me brindó desde el inicio de mis estudios de ingeniería hasta la fecha.

A todos mis compañeros y amigos, que en los momentos buenos o malos estuvieron siempre presentes.

## **RESUMEN**

En la presente tesis se estudian los métodos y procedimientos necesarios para realizar un experimento pseudodinámico. Se revisan los aspectos fundamentales de dinámica estructural: formulación de ecuación de movimiento para sistemas de uno y varios grados de libertad y amortiguamiento viscoso, básicos en el desarrollo del procedimiento. Además, se muestra el método numérico de integración para la ecuación de movimiento que se concluyó, es el más apropiado para ser utilizado durante una prueba pseudodinámica. Se presenta el desarrollo del método pseudodinámico: antecedentes y formulación. Adicionalmente, se enumera el equipo necesario para realizar una prueba de este tipo. Se listan los errores que se pueden generar durante el desarrollo de una prueba pseudodinámica y, la manera de controlarlos adecuadamente. Se muestra el programa de control de experimentos pseudodinámicos, desarrollado en el presente trabajo y, la validación del mismo por medio de simulaciones numéricas utilizadas en la evaluación de sistemas de uno y varios grados de libertad. Finalmente, se presentan las conclusiones a las que se llegó después de realizar el estudio.

## **CONTENIDO**

<b>Agradecimientos</b>	iii
<b>Resumen</b>	iv
<b>Lista de Figuras</b>	vii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1.- ANTECEDENTES TEÓRICOS</b>	4
1.1.- Sistemas de un grado de libertad	5
1.2.- Sistemas de varios grados de libertad	6
1.2.1.- Modelos discretos	7
1.2.2.- Ecuaciones de equilibrio dinámico de sistemas de MGDL	8
1.2.3.- Amortiguamiento viscoso	10
<b>2.- MÉTODOS DE INTEGRACIÓN</b>	14
2.1.- Integración paso a paso	17
<b>3.- PROCEDIMIENTO PSEUDODINÁMICO</b>	19
3.1.- Métodos experimentales	20
3.2.- Método pseudodinámico	22
3.2.1.- Antecedentes históricos de prueba pseudodinámica	23
3.2.2.- Generalidades del método	25
3.2.3.- Formulación del método pseudodinámico	28
3.3.- Método pseudodinámico, técnica de subestructuración	38
<b>4.- EQUIPO DE CONTROL DE PRUEBAS PSEUDODINÁMICAS</b>	42
4.1.- Descripción general del equipo	43
4.2.- Origen de errores	44

4.2.1.- Errores numéricos	45
4.2.2.- Errores experimentales	46
<b>5.- PROGRAMA DE CONTROL DE PRUEBAS PSEUDODINÁMICAS</b>	<b>51</b>
<b>6.- EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE PROGRAMA PSEUDODINÁMICO</b>	<b>56</b>
6.1.- Sistemas lineales	57
6.1.1.- Sistema de un grado de libertad	59
6.1.2.- Sistema de varios grados de libertad	61
6.2.- Sistema no lineal	66
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>71</b>
<b>Apéndice A.- PSD, Manual del Usuario</b>	<b>73</b>
<b>Apéndice B.- Tarjeta de adquisición de datos</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

- 1.1.- Modelo de un sistema de 1GDL.
- 1.2.- Discretización de una viga con idealización de masas concentradas.
- 1.3.- Discretización de una viga con concepto de elemento finito.
- 1.4.- Sistema de varios grados de libertad.
- 1.5.- Amortiguamiento de Rayleigh.
  
- 3.1.- Esquema de experimento pseudodinámico.
- 3.2.- Implementación del Método- $\alpha$  ( Hilber y Hughes ) para prueba pseudodinámica.
- 3.3.- Técnica de Subestructuración.
  
- 4.1.- Ganancia de desplazamiento lenta.
- 4.2.- Ganancia de desplazamiento alta.
- 4.3.- Ganancia de desplazamiento óptima.
  
- 6.1.- Registro SCT, 19 de septiembre de 1985, México, D.F.
- 6.2.- Sistema de un grado de libertad evaluado.
- 6.3.- Historia de desplazamientos del sistema de un grado de libertad.
- 6.4.- Modelo de múltiples grados de libertad evaluado.
- 6.5.- Masas y cargas para análisis del sistema de MGDG.
- 6.6.- Secciones y armado de elementos del modelo.
- 6.7.- Resistencias de elementos.
- 6.8.- Frecuencias y modos de vibrar de sistema de MGDG.
- 6.9.- Historia de desplazamientos del sistema de dos grados de libertad.
- 6.10.- Detalle de respuesta del sistema de MGDG.
- 6.11.- Modelo de un grado de libertad con comportamiento no lineal.
- 6.12.- Respuesta del sistema de 1GDL no lineal.
- 6.13.- Relación cortante-desplazamiento.
- 6.14.- Detalle de variación del cortante en el tiempo, sistema 1GDL.



## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, se cuenta con un sinnúmero de métodos que permiten conocer de manera más cercana el comportamiento de las estructuras y los elementos que las componen. Sin embargo, aún y cuando existen modelos matemáticos que buscan representar dicho comportamiento, es sumamente difícil, ya que todos ellos tienen limitaciones debido a las idealizaciones o simplificaciones que se consideran durante su desarrollo. Además, algunos de ellos no han sido calibrados de manera adecuada. Por tanto, la única manera de conocer de manera más cercana el comportamiento real de las estructuras es por medio de pruebas experimentales.

Al pasar de los años y con el avance de la ingeniería sísmica, se han desarrollado técnicas experimentales para evaluar el comportamiento de los distintos sistemas estructurales; sin embargo, todas ellas presentan carencias que limitan su uso.

Las técnicas más comúnmente utilizadas y algunas de sus limitantes son:

- (1) Mesa vibradora.- Presenta limitaciones en cuanto al tamaño y peso de los modelos que pueden ser ensayados; y,
- (2) Análisis cuasi-estático.- Su principal carencia es la dificultad de llevar a cabo una correcta evaluación de la historia de carga o desplazamiento a aplicar al espécimen durante la prueba.

Debido a lo anterior es importante que sean desarrollados nuevos procedimientos experimentales en los que se busque eliminar las carencias de los métodos existentes.

En el presente trabajo se muestra un método experimental, propuesto y utilizado desde los años 70, aunque con algunas carencias por el equipo de cómputo y de laboratorio, así como por los métodos numéricos con que se implementó.

Dicha técnica es conocida como “Prueba Pseudodinámica”. Este método hace uso de las bondades de los estudios analítico y experimental, tomando las ventajas de cada uno de ellos para combinarlos en uno solo.

La Prueba Pseudodinámica es una técnica en la que una estructura es ensayada experimentalmente. La historia de desplazamientos de la estructura es calculada por medio de una computadora en la que se resuelve la ecuación de movimiento del sistema; los desplazamientos obtenidos son aplicados estáticamente al modelo por medio de actuadores servo-hidráulicos y, las fuerzas necesarias para inducir tales desplazamientos, que corresponden a las fuerzas restauradoras, son medidas directamente del espécimen, en un procedimiento en línea. Los valores de fuerza medidos son usados en el cálculo del desplazamiento del siguiente paso de integración

El punto más importante de mencionar es que, en un experimento pseudodinámico el valor de la fuerza restauradora es medido directamente del modelo. Al medir el valor de las fuerzas del espécimen se tiene el valor de rigidez,  $K$ , real y, por tanto, al calcular los desplazamientos subsecuentes no se recurre a la evaluación de rigidez de un modelo de histéresis, por lo que las incertidumbres asociadas con el comportamiento no lineal del espécimen son eliminadas.

Para aplicar los desplazamientos y medir las fuerzas se requiere del mismo equipo utilizado en experimentos cuasi-estáticos. Por tal motivo, es factible que experimentos pseudodinámicos puedan ser llevados a cabo en muchos de los laboratorios de estructuras existentes alrededor del mundo.

Al ser un proceso cuasi-estático, el experimento se lleva a cabo fuera del tiempo real del movimiento, por lo que los efectos dinámicos como la velocidad de aplicación de carga, no son considerados; sin embargo, se tiene una visualización adecuada del experimento, lo que permite observar detalladamente el comportamiento del modelo durante la prueba.

Este procedimiento permite prescindir de una mesa vibradora, equipo sumamente costoso y que no esta disponible en muchos laboratorios de estructuras.

El objetivo de este trabajo es revisar y seleccionar los procedimientos que se consideran más adecuados para ser utilizados durante una prueba pseudodinámica y, con base en estos algoritmos, desarrollar las herramientas necesarias para llevar a cabo un experimento de este tipo.

Dentro de este estudio se lleva a cabo una revisión de aspectos básicos de dinámica estructural fundamentales dentro del procedimiento pseudodinámico como: desarrollo de las ecuaciones que representan al movimiento, discretización, etc.; además, se presenta el algoritmo de solución de la ecuación de equilibrio dinámico que se consideró más apropiado para ser implementado dentro de un experimento pseudodinámico.

Posteriormente, se muestra el procedimiento pseudodinámico, presentando un desarrollo detallado del proceso que se debe seguir al realizar un experimento de este tipo. Además, se hace una revisión de las ventajas que pueden ser obtenidas de este tipo de experimentación al ser implementado con alguna variación, como lo es el caso de la técnica de "Subestructuración".

Adicionalmente, con base en algunas investigaciones consultadas durante la revisión bibliográfica realizada, se enumeran los aspectos más importantes que deben ser cuidados en la implementación de una prueba pseudodinámica para evitar que se presenten errores durante la misma, principalmente en lo referente al proceso de instrumentación del espécimen.

Dado que el experimento será controlado por una computadora en línea, en la que se modelan los aspectos dinámicos del modelo y que calcula la historia de desplazamientos a aplicar al espécimen, se desarrolló un programa que permite tener un control detallado y una visualización clara del experimento. Dicho programa es validado por medio de simulaciones numéricas lineales y no lineales presentadas en los capítulos finales.

# CAPÍTULO 1

---

---

## *ANTECEDENTES TEÓRICOS*

---

---

## ANTECEDENTES TEÓRICOS

El análisis dinámico de una estructura se hace complicado debido a que las fuerzas de inercia generadas por un movimiento sísmico son resultado de una aceleración de sus masas. A su vez, los desplazamientos que sufren las masas dependen de la magnitud de las fuerzas de inercia. Este círculo cerrado de causa y efecto entre fuerzas y desplazamientos solamente puede ser atacado formulando el problema en términos de ecuaciones diferenciales. Debido a que la masa de los elementos está distribuida en su toda su longitud, para poder determinar las fuerzas de inercia completamente es necesario que los desplazamientos y las aceleraciones sean determinados para cada uno de los puntos a lo largo de la longitud del elemento, situación que complica más su estudio.

Para entender el comportamiento de una estructura durante un movimiento sísmico, en lo que sigue se revisan, de manera breve, algunos aspectos básicos.

### 1.1.- Sistemas de un Grado de Libertad (1GDL)

El desplazamiento del terreno queda denotado por  $u_s$ , el desplazamiento total de la masa por  $u_T$ , y el desplazamiento relativo entre la masa y el suelo por  $u$ . En cada instante de tiempo estos desplazamientos están relacionados por:

$$u_T = u + u_s \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Considerando un sistema como el que se muestra en la Fig. 1, la ecuación de equilibrio dinámico del sistema queda definida por una ecuación diferencial de segundo orden:

$$m\ddot{u}_T(t) + c\dot{u}(t) + r(t) = 0 \quad (\text{Ec. 1.2})$$

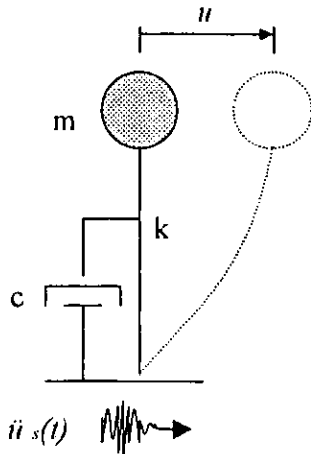


Fig. 1. 1.- Modelo de un sistema de IGDL.

donde:

$$\ddot{u}_T = \ddot{u} + \ddot{u}_s$$

Por tanto, la ecuación queda de la forma:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + r(u) = -m\ddot{u}_s(t) \quad (\text{Ec.1.3})$$

Donde  $\ddot{u}(t)$ ,  $\dot{u}(t)$  y  $u(t)$  son la aceleración, velocidad y desplazamiento del sistema;  $\ddot{u}_s(t)$  es la aceleración del terreno;  $m$ ,  $c$  y  $r$  son la masa, amortiguamiento y fuerza restauradora del sistema, respectivamente.

El equilibrio de la ecuación diferencial de movimiento (Ec. 1.3) debe ser satisfecho en cada instante de tiempo,  $t$ . Para la solución de la misma, en la literatura se han propuesto distintos métodos, entre éstos se pueden mencionar: la integral de Duhamel, métodos de integración numérica como el de Diferencias Centrales, los métodos de Newmark y sus derivaciones, etc.

Es de trascendencia hacer notar que la solución de sistemas de un grado de libertad es importante ya que las características esenciales de la respuesta de una estructura de varios grados de libertad se llegan a estimar con aceptable precisión al modelar la estructura mediante un sistema de un grado de libertad con periodo igual al fundamental de la estructura (Chopra,1995).

## 1.2.- Sistemas de varios grados de libertad (MGDL)

Como se mencionó con anterioridad, para definir completamente las fuerzas de inercia es necesario conocer los desplazamientos y aceleraciones de las masas a las que están asociadas cada una de ellas; en los casos en que la masa se encuentre uniformemente distribuida en toda la longitud de los elementos, será necesario conocer la historia de desplazamiento y aceleración en todos y cada uno de los puntos a lo largo del elemento.

Por tanto, para simplificar el proceso de análisis dinámico de una estructura es importante discretizar el modelo, es decir, establecer un número finito de grados de libertad, que representen de manera adecuada el comportamiento de la misma. A continuación se presenta una pequeña revisión de los métodos de discretización de estructuras.

### 1.2.1.- Modelos discretos

En un análisis dinámico, un sistema estructural puede ser considerado como un ensamble de elementos estructurales interconectados en un número finito de nudos, en los cuales se concentra la masa del sistema. El estado de deformación de este *sistema discreto - paramétrico idealizado* es completamente determinado por los grados de libertad en los puntos nodales.

Este método de discretización intenta simplificar el procedimiento analítico para un sistema estructural el cual tiene masa uniformemente distribuida y un número infinito de grados de libertad.

Existen varios procedimientos para llevar a cabo la discretización de un sistema, entre éstos, podemos mencionar:

#### a) Procedimiento de masas concentradas

Si uno acepta que las masas están concentradas en unos cuantos puntos discretos, el problema analítico se puede reducir de manera significativa porque las fuerzas de inercia se desarrollan solo en estos puntos. En este caso, únicamente es necesario definir los desplazamientos y aceleraciones en estas localizaciones discretas (Fig. 1.2).

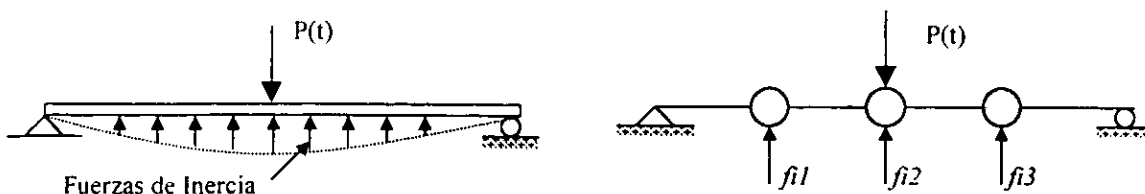


Fig. 1.2.- Discretización de una viga con idealización de masas concentradas.

## b) Procedimiento basado en el método de elemento finito

Este procedimiento provee una idealización conveniente y real del sistema y es particularmente efectivo para análisis con computadora digital. La idealización del tipo de elemento finito es aplicable a todo tipo de estructuras: marcos, placas y cascarones. Usando este método analítico, es posible formular las matrices de masas y rigideces de cada uno de los elementos, de las cuales se pueden ensamblar las matrices globales de masas y de rigidez de la estructura por el método directo de rigideces (Fig. 1.3). El número total de grados de libertad en dichos sistemas es la suma de los grados de libertad de todos los puntos nodales.

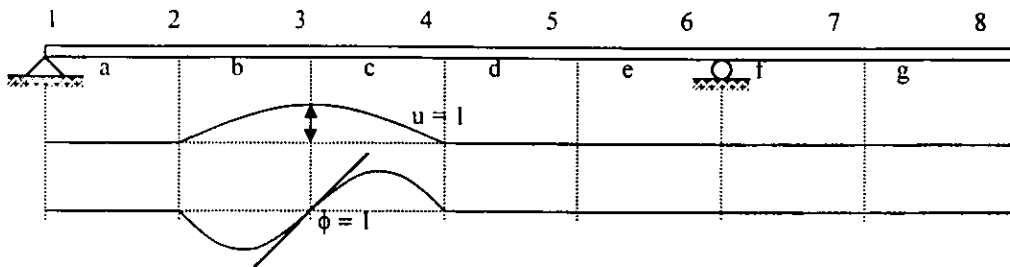


Fig. 1. 3.- Discretización de una viga con concepto de elemento finito.

En resumen, con un modelo discreto se busca representar de manera adecuada un sistema continuo considerando solo un número finito de grados de libertad. Así, es posible encontrar una respuesta más aproximada si incrementamos el número de grados de libertad a considerar; pero, en general, un número pequeño de grados de libertad será suficiente para obtener una solución aproximada. La selección del número de grados de libertad depende de las propiedades de la estructura.

### 1.2.2.- Ecuaciones de equilibrio dinámico de sistemas de MGDL

Por simplicidad se analiza un marco de cortante de dos niveles y una crujía con masas concentradas en las losas, como el que se muestra en la Fig. 1.4.



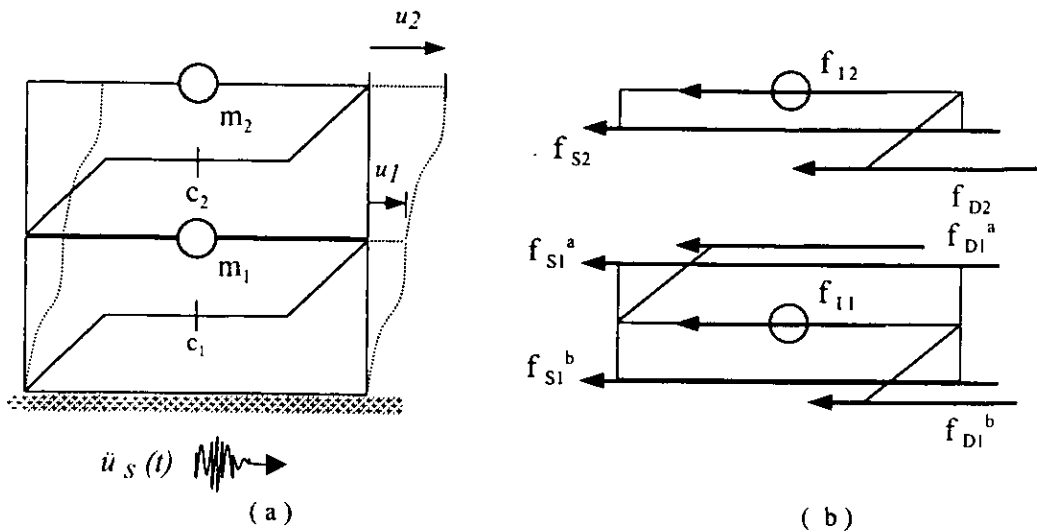


Fig. 1.4.- Sistema de varios grados de libertad. (a) Marco de cortante de dos niveles; (b) Fuerzas actuando

De acuerdo al diagrama de cuerpo libre de los grados de libertad considerados:

$$f_I + f_D + f_S = 0 \quad (\text{Ec. 1.4})$$

donde:

$$f_I = \begin{Bmatrix} f_{I1} \\ f_{I2} \end{Bmatrix}; \quad f_{I1} = m_1 \ddot{u}_{T1} \quad f_{I2} = m_2 \ddot{u}_{T2}; \quad \ddot{u}_T = \ddot{u} + \ddot{u}_s \quad (\text{Ec. 1.5})$$

$$f_D = \begin{Bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{Bmatrix}; \quad f_{D1} = f_{D1}^a + f_{D1}^b = c_1 \dot{u}_1 + c_2 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) \quad f_{D2} = c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad (\text{Ec. 1.6})$$

$$f_S = \begin{Bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{Bmatrix}; \quad f_{S1} = f_{S1}^a + f_{S1}^b = R_1 \quad f_{S2} = R_2 \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Sustituyendo en la ecuación 1.2 y ordenando en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_s \quad (\text{Ec. 1.8})$$

De esta manera es factible obtener una ecuación similar a la que se obtuvo del análisis de sistemas de un grado de libertad, y que queda de la forma:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + \{R(t)\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_s(t) \quad (\text{Ec. 1.9})$$

donde:  $\{\ddot{u}(t)\}$ ,  $\{\dot{u}(t)\}$  y  $\{u(t)\}$  son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento del sistema, respectivamente;  $\ddot{u}_s(t)$  es la aceleración del terreno;  $[M]$  y  $[C]$  son la matriz de masas y de amortiguamiento y  $\{R(t)\}$  es el vector de fuerzas restauradoras del sistema.

### 1.2.2.- Amortiguamiento Viscoso

El fenómeno mediante el cual el estado de vibración disminuye su amplitud es conocido como amortiguamiento. Dentro del amortiguamiento, la energía del sistema es disipada por distintos mecanismos los cuales, a menudo, se presentan de manera simultánea. Mucha de la energía liberada tiene su origen, aparentemente, en el efecto térmico que se genera de deformaciones repetidas, así como de la fricción interna entre las partículas cuando el cuerpo se mueve; otros mecanismos de disipación que se pueden mencionar son la fricción en las conexiones de acero, abertura y cerrado de microgrietas en el concreto, fricción entre la estructura y los elementos no estructurales, etc. Debido a lo anterior resulta imposible identificar o describir de manera matemática cada uno de estos mecanismos de disipación de energía en las estructuras. Como resultado de lo anterior, el amortiguamiento ha sido representado satisfactoriamente por un amortiguamiento viscoso lineal, el cual debe ser seleccionado de tal manera que la energía disipada por éste sea equivalente a la disipada por medio de todos los demás mecanismos.

Las estructuras pueden ser clasificadas, de acuerdo a su amortiguamiento, en dos grandes grupos: las que presentan amortiguamiento clásico y las de amortiguamiento no clásico. El primero engloba a todas aquellas que presentan mecanismos de amortiguamiento similares dentro de toda la estructura, mientras que al segundo pertenecen los sistemas que consisten de dos o más partes con niveles de amortiguamiento significativamente diferentes.

El amortiguamiento clásico es una idealización apropiada si los mecanismos de amortiguamiento son similares a lo largo de toda la estructura. Uno de los procedimientos utilizados para calcularlo y que, se incluye en el presente trabajo, es el denominado amortiguamiento de Rayleigh (Chopra, 1995), a describir a continuación

Primero se considera amortiguamiento proporcional a la masa y amortiguamiento proporcional a la rigidez:

$$c = a_0 m$$

$$c = a_1 k$$

( Ec. 1.10 )

donde las constantes  $a_0$  y  $a_1$  tienen unidades de  $s^{-1}$  y  $s$ , respectivamente.

Tomando en cuenta que una estructura tiene amortiguamiento proporcional a la masa, del análisis modal, se puede mostrar que:

$$\zeta_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n}$$

$$C_n = a_0 M_n$$

$$a_0 = 2\zeta_n \omega_n$$

( Ec. 1.11 )

así, el porcentaje de amortiguamiento modal es:

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n}$$

( Ec. 1.12 )

Análogamente, para un sistema con amortiguamiento proporcional a la rigidez, se establece que:

$$C_n = a_1 \omega_n^2 M_n$$

$$\zeta_n = \frac{a_1}{2} \omega_n$$

$$a_1 = \frac{2\zeta_n}{\omega_n} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

Se ha observado que la variación de los porcentajes de amortiguamiento modal con las frecuencias que representan no es consistente con datos experimentales que indican el mismo porcentaje de amortiguamiento para varios modos de una estructura (Chopra, 1995), por lo que ninguna de estas propuestas es práctica para análisis de sistemas de múltiples grados de libertad.

Una propuesta que ha generado resultados aceptables, la cual, lleva a cabo una combinación lineal de los amortiguamientos proporcionales a la masa y rigidez, es el Amortiguamiento de Rayleigh, que establece:

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Así, el porcentaje de amortiguamiento del modo  $n$  de tal sistema es:

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (\text{Ec. 1.15})$$

Los coeficientes  $a_0$  y  $a_1$  pueden ser calculados a partir de los valores de porcentaje de amortiguamiento crítico,  $\zeta_i$  y  $\zeta_j$ , correspondientes a los modos de vibrar  $i$  y  $j$ .

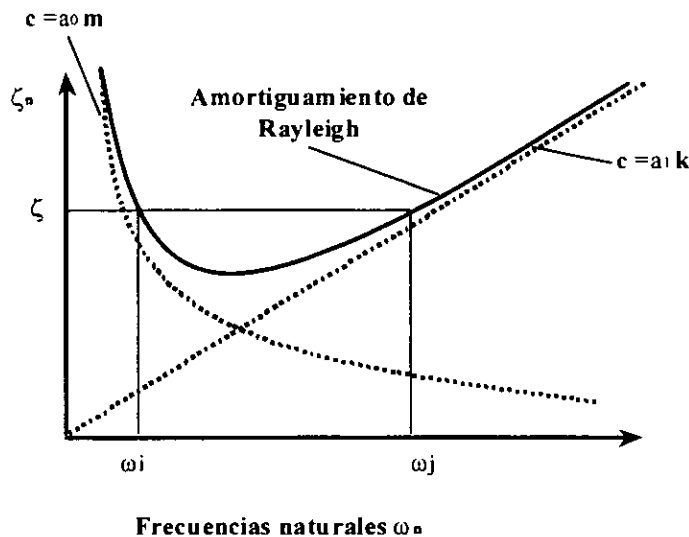


Fig. 1.5.- Amortiguamiento de Rayleigh

De esta manera, y expresado en forma matricial tenemos:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Considerando que ambos modos tienen el mismo coeficiente de amortiguamiento, lo que se ha visto que es razonable de acuerdo a resultados experimentales, resolvemos el sistema para conocer los valores de  $a_0$  y  $a_1$ :

$$\begin{aligned} a_0 &= (2\zeta - \omega_i a_1) \omega_i \\ a_1 &= (2\zeta - a_0/\omega_j) (1/\omega_j) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

desarrollando algebraicamente obtenemos que:

$$\begin{aligned} a_0 &= \zeta \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \\ a_1 &= \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Así, con los valores de los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  y con la ecuación 1.14 la matriz de amortiguamiento es conocida.

## CAPÍTULO 2

---

---

# *MÉTODOS DE INTEGRACIÓN*

---

---

## MÉTODOS DE INTEGRACIÓN

En el capítulo 1 se mostró el conjunto de ecuaciones que gobiernan el movimiento de sistemas de uno y de varios grados de libertad sometidos a un movimiento sísmico, pero, ¿Cómo resolver dichas ecuaciones durante un análisis en el dominio del tiempo de manera eficiente y sencilla?

Muchos investigadores han centrado sus estudios en el tópico que responde la pregunta hecha anteriormente. Así, y con el paso de los años se han propuesto en la literatura distintos métodos numéricos con los que la ecuación de equilibrio dinámico puede ser resuelta de manera conveniente; entre ellos se pueden mencionar el de Diferencias Centrales, Newmark, combinaciones implícito – explícito, etc.

Dichos métodos, que proporcionan una solución aproximada de la respuesta del modelo ante el movimiento sísmico, asumen que la solución de cada paso es función del paso o pasos previos y de las características dinámicas de la estructura.

Al llevar a cabo el análisis de un sistema con este tipo de algoritmos, el modelo será analizado para un registro sísmico establecido. El tiempo,  $T$ , para el cual será evaluada la respuesta es dividido en  $N$  intervalos de tiempo  $\Delta t$  iguales:

$$\Delta t = \frac{T}{N}$$

Así, se debe cumplir el equilibrio de la ecuación de movimiento para todos y cada uno de los pasos de integración; por tanto, debe de haber equilibrio en  $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t$ .

El hablar de eficiencia en los métodos de solución, nos lleva a analizar ciertos aspectos o características importantes a mencionar:

1.- Aproximación.- Que la respuesta obtenida con los métodos de solución no difiera significativamente de la respuesta obtenida con la solución exacta.

2.- Estabilidad.- Un método de solución será estable si el error acumulado en cada paso de integración es controlado y se encuentra dentro de límites aceptables. Este aspecto es importante ya que en algunos casos, cuando la estructura tiene modos con periodos cortos, es necesario utilizar incrementos de tiempo sumamente pequeños para controlar el error.

3.- Convergencia.- Aproximación de la respuesta obtenida con el método numérico con respecto a la exacta, cuando el intervalo de tiempo  $\Delta t$  tiende a cero.

Al llevar a cabo un análisis es importante que se seleccione un método de solución que cuente con características adecuadas.

Los métodos numéricos, de acuerdo a sus características de solución, pueden ser englobados en dos grandes grupos:

- a) Métodos explícitos.- En este grupo se engloban todos aquellos métodos en los que la solución en cada paso es calculada en función del paso o pasos previos solamente.
- b) Métodos implícitos.- Aquí se agrupan los métodos en los que la solución en cada paso es función del paso previo y del paso que se está calculando; por tanto, son métodos en los que se requiere un proceso de iteración.

De acuerdo a la definición mostrada anteriormente, se podría decir que los métodos explícitos tienen mayores ventajas que los implícitos ya que no requieren de un proceso de iteración en la solución de un paso de integración, con lo que el costo computacional es menor; sin embargo, la mayoría de estos métodos tienen una limitante sumamente grande: son condicionalmente estables, es decir, requieren de un valor de  $\Delta t$  pequeño para asegurar su estabilidad.



Por lo tanto, la tendencia reciente es utilizar métodos implícitos, por sus propiedades superiores.

### 2.1.-Integración Paso a Paso.

En la búsqueda por encontrar métodos que sean eficientes, se han propuesto varios métodos de solución para la ecuación de movimiento. Sin embargo, de acuerdo a lo visto en literatura, uno de ellos es el más apropiado para ser aplicado en el procedimiento a desarrollar en el presente estudio. A continuación se presenta una breve revisión de sus características y limitantes.

El Método- $\alpha$  (Hilber, Hughes y Taylor, 1977), es un algoritmo implícito e incondicionalmente estable; presenta características de convergencia, estabilidad y aproximación superiores a las de otros métodos que han sido utilizados comúnmente en investigaciones elaboradas con anterioridad. Para estructuras de varios grados de libertad el Método- $\alpha$  define:

$$M a_{i+1} + (1 + \alpha) C v_{i+1} - \alpha C v_i + (1 + \alpha) r_{i+1} - \alpha r_i = (1 + \alpha) f_{i+1} - \alpha f_i \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$d_{i+1} = d_i + \Delta t v_i + \Delta t^2 \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) a_i + \beta a_{i+1} \right] \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$v_{i+1} = v_i + \Delta t \left[ (1 - \gamma) a_i + \gamma a_{i+1} \right] \quad (\text{Ec. 2.3})$$

en las cuales  $a_i$  y  $v_i$  son los vectores de aceleración y velocidad del sistema en el tiempo  $i\Delta t$ , respectivamente;  $r_i$  es el vector de fuerza restauradora,  $f_i$  es el vector de fuerza externa,  $M$  y  $C$  son la matriz de masas y de amortiguamiento del sistema, respectivamente.

Las propiedades de disipación numérica del algoritmo seleccionado son controladas por otros parámetros distintos de  $\Delta t$ , definidos por  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .

De los estudios realizados por Hilber, Hughes y Taylor, se establece que con una combinación apropiada de valores negativos de  $\alpha$ , así como valores particulares de  $\beta$  y  $\gamma$ , se puede crear un algoritmo que tenga características superiores de estabilidad y aproximación.

Los valores para  $\beta$  y  $\gamma$  quedan definidos por:

$$\beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$\gamma = \frac{1}{2} - \alpha \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Además, se establece que el algoritmo es estable en el límite de  $\Delta t/T \rightarrow \infty$  si:

$$-\frac{1}{2} \leq \alpha \leq 0.$$

De acuerdo a los resultados mostrados por Hilber y colaboradores, se encontró por experimentación numérica que para un rango práctico, el valor adecuado para el parámetro  $\alpha$  está dentro de los siguientes límites:

$$-\frac{1}{3} \leq \alpha \leq 0 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Se puede hacer notar que el algoritmo pertenece o es una derivación de la familia de algoritmos de Newmark ya que, considerando a  $\alpha = 0$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  toman valores de 0.25 y 0.5, respectivamente, con lo que el método pasa a ser el algoritmo de Newmark en su modalidad de aceleración constante.

## CAPÍTULO 3

---

---

# *PROCEDIMIENTO PSEUDODINÁMICO*

---

---

## ***PROCEDIMIENTO PSEUDODINÁMICO***

### **3.1.- Métodos Experimentales**

El comportamiento de estructuras sometidas a movimientos sísmicos es un área en la que muchos investigadores alrededor de todo el mundo han centrado sus estudios; en general, las investigaciones que han sido elaboradas durante la historia de la ingeniería sísmica se pueden englobar dentro de dos grandes grupos: las que han sido desarrolladas de manera puramente analítica y las experimentales. De las experiencias que se han obtenido durante la evolución de esta rama de la ingeniería se ha podido establecer que la manera más eficiente y real de evaluar cada uno de los diferentes sistemas estructurales, su comportamiento y su capacidad para desarrollar grandes deformaciones, es sin duda, la investigación de tipo experimental. Por tal motivo, durante todo este tiempo y, en la búsqueda por encontrar técnicas eficientes que puedan ayudar a entender de una manera más adecuada y realista el comportamiento de dichos sistemas estructurales durante un sismo, se han desarrollado diferentes métodos para llevar a cabo estudios de tipo experimental, entre éstos se pueden mencionar los siguientes:

- a) *Mesa Vibradora.* - Posiblemente, el método más realista para evaluar la respuesta dinámica no lineal de una estructura en particular es colocarla en una mesa vibradora y sujetarla a un movimiento previamente seleccionado; como es sabido, las mesas vibradoras tienen una limitación sumamente grande: el tamaño y peso de especímenes que pueden ser probados en ellas es limitado, situación que origina que solo puedan ser ensayados modelos a escalas pequeñas. Ensayar testigos a escalas muy reducidas acarrea problemas de similitud dinámica del material. Adicionalmente, la capacidad de desplazamiento que se tiene en una mesa vibradora puede ser limitada, con lo que la señal a utilizar en el experimento tiene que ser escalada, con los inconvenientes que esto genera. Además, la instrumentación es mucho más complicada debido a que tales pruebas requieren de equipo y personal muy especializado, aunado a lo anterior se puede mencionar que la instalación de una mesa vibradora requiere de mayor inversión

inicial, por las necesidades mismas del equipo, situación que al final refleja un costo muy elevado.

- b) *Vibración Forzada.*- Las pruebas de Vibración Forzada de edificios a escala natural en el rango inelástico también han sido propuestas, e incluso tales experimentos han sido desarrollados exitosamente (Mahin y Shing, 1985). La mayor limitación que tiene este método es que, es muy difícil simular de manera realista la distribución y la historia de cargas desarrolladas durante excitaciones sísmicas. Ésta es una gran limitante ya que no es posible enfocarse a establecer una respuesta inelástica más realista de la estructura basados en una historia de cargas que puede no estar muy cercana a la que se presentaría durante un sismo severo. Mientras éste y otros innovadores métodos dinámicos son prometedores, el alto costo que implican limita su uso a estructuras especiales o a problemas complejos como en los que se presenta interacción suelo – cimentación – estructura.
- c) *Métodos Cuasi-estáticos.*- Es el método más económico y por tanto el más usado en la actualidad para obtener información del comportamiento inelástico de estructuras. En éste, historias de carga o desplazamiento predeterminadas son impuestas a pequeños sistemas estructurales o subensambles básicos de sistemas más grandes. Tales experimentos utilizan equipo de prueba convencional y permiten la observación detallada del comportamiento del espécimen durante la prueba. Para determinar la historia de carga apropiada se puede llevar a cabo un análisis dinámico inelástico analítico de la estructura en cuestión mediante algunos de los programas existentes en el mercado. El principal inconveniente de este tipo de experimentos es que al realizar el análisis para obtener la historia de carga o desplazamiento se recurre a modelos matemáticos que buscan representar el comportamiento no lineal de los elementos que conforman a la estructura; sin embargo, muchos de los modelos existentes presentan discrepancias con respecto al comportamiento real de los mismos, por lo tanto, la historia de desplazamientos o carga obtenida de dicho análisis puede diferir de manera

significativa de la real, por lo que al aplicarse al modelo durante el experimento el resultado diferirá del que tendría en realidad.

Como se mencionó en párrafos anteriores, aunque la respuesta más real es obtenida por métodos experimentales, las técnicas existentes tienen limitaciones de diferente índole, lo que permite establecer que aún existen algunas deficiencias en la evaluación de sistemas estructurales.

### **3.2.- Método Pseudodinámico**

En la búsqueda de métodos que permitan representar de manera más real el efecto que tienen los sismos sobre las estructuras, en los años 70 se propuso un procedimiento experimental para estudiar el comportamiento de sistemas estructurales sometidos a movimientos de tierra severos; tal método ha sido denominado “Método de Control por Computadora en Línea” (Mosalam, White y Ayala, 1998), llamado también “Método Pseudodinámico”, con el cual se busca representar de manera más eficiente la estructura a examinar y las fuerzas externas a las que estará sometida durante un sismo.

Este método es único porque combina el análisis numérico con el experimental y utiliza las ventajas de cada uno de ellos. Con esta técnica, se puede simular la respuesta sísmica de un sistema estructural en el dominio del tiempo, pero sin la necesidad de contar con una mesa vibradora.

El método pseudodinámico es un procedimiento en el cual la respuesta dinámica de la estructura es calculada por medio de una computadora; los desplazamientos obtenidos son aplicados estáticamente al modelo por medio de actuadores servo-hidráulicos y, las fuerzas necesarias para inducir tales desplazamientos, que corresponden a las fuerzas restauradoras, son medidas directamente del espécimen, en un procedimiento en línea. Los valores de fuerza medidos son usados en el cálculo del desplazamiento del siguiente paso de integración; así, los efectos dinámicos y el daño progresivo o comportamiento no lineal del espécimen son incluidos directamente en el proceso. Esta técnica es esencialmente idéntica a un análisis tradicional en el

tiempo, pero en lugar de realizar idealizaciones sobre el comportamiento no lineal de la estructura, las fuerzas restauradoras son medidas directamente del espécimen estudiado. El cálculo de los desplazamientos que se aplican al modelo está basado en la integración paso a paso de la ecuación diferencial de 2º orden gobernante del movimiento del sistema, asumiendo masas y propiedades de amortiguamiento, así como una función de fuerza correspondiente a la carga dinámica seleccionada.

Durante la prueba, los desplazamientos y las fuerzas restauradoras en el modelo son medidas usando equipo normal que se utiliza cuando se realizan pruebas estáticas, factible de encontrar disponible en muchos de los laboratorios de pruebas de las diferentes instituciones de investigación.

### **3.2.1.- Antecedentes históricos de la prueba pseudodinámica**

El concepto original de la prueba “ En Línea ” se originó en el año de 1969 con Hakuno (Takanashi y Nakashima, 1987). Él analizó un sistema de un grado de libertad usando un actuador electromagnético controlado por una computadora analógica. La ecuación de movimiento del sistema analizado fue formulada en la computadora y, la respuesta del sistema bajo carga sísmica fue investigada en tiempo real. La idea de simular la respuesta sísmica sin el uso de la mesa vibradora fue muy informativa, aunque los resultados que se tuvieron fueron pobres debido a las limitaciones de aproximación y control del equipo existente en esa época.

En 1974, Takanashi extendió la idea de Hakuno y otras a una forma más práctica (Takanashi y Nakashima, 1987). Reemplazó la computadora analógica por una digital, con lo que la ecuación de movimiento fue discretizada en el dominio del tiempo y la trató como una ecuación diferencial. Con estas modificaciones, la carga aplicada por los actuadores no necesitaba ser en tiempo real, con lo que fue posible el proceso carga – pausa - carga.

Un Programa de Investigación Sísmica de Cooperación entre Estados Unidos y Japón en los años 80 fue el detonante para el desarrollo del método. Hubo un gran esfuerzo de

investigación en los Estados Unidos, principalmente en la Universidad de California, Berkeley y en la Universidad de Michigan, Ann Arbor (Buonopane y White, 1999). En este tiempo los investigadores se enfocaron en la verificación de la aproximación del método y en la investigación del control de ciertos parámetros de experimentación que afectaban la prueba.

Yamazaki (Takanashi y Nakashima, 1987) hizo comparaciones de experimentos elaborados en mesa vibradora con experimentos pseudodinámicos y encontró que: (1) los efectos del índice de carga o velocidad de aplicación de la carga llevan a reducir las fuerzas restauradoras en pruebas pseudodinámicas, y (2) los errores experimentales en la medición de los desplazamientos y de las fuerzas restauradoras pueden producir efectos irreales. Cabe mencionar, que de acuerdo con los resultados de pruebas realizadas durante este tiempo, se ha encontrado que los efectos del índice de carga son tolerables en comparación con las incertidumbres en el modelado a pequeña escala en mesas vibratoras (Shing y Mahin, 1988).

Debido a las limitaciones del equipo de cómputo usado en la mayoría de las investigaciones de esta primera generación de experimentos pseudodinámicos, para la solución de la ecuación diferencial gobernante del sistema se hacía uso de métodos de integración explícitos como el de Diferencias Centrales o el de Newmark, debido a que el empleo de métodos implícitos representaba un alto costo en el tiempo de experimentación, dado que en este tipo de métodos se requiere de un proceso de iteración en cada instante de tiempo.

Con el desarrollo de equipos de cómputo mejores y más veloces y, con la intención de usar este tipo de experimentación para estudiar comportamiento no lineal de las estructuras, se implementó el método pseudodinámico utilizando algoritmos de integración implícitos. Lo anterior se dio debido a que los métodos implícitos poseen propiedades de convergencia, estabilidad y aproximación superiores a los métodos explícitos.

Thewalt y Mahin (Shing, Vannan y Carter, 1991) desarrollaron un método implícito para probar estructuras de múltiples grados de libertad sin iteración numérica; esto es logrado por medio de una fase predictora y un dispositivo electrónico de control que corrige dicha fase; sin



embargo, esta técnica es difícil de implementar por el software requerido; además, debido a que la convergencia del desplazamiento se logra por medio del dispositivo analógico, se pueden introducir errores por la posición de los actuadores, los que dependen del comportamiento del control servo-hidráulico.

En lo referente al intervalo no lineal, durante el cual la rigidez varía en cada instante de tiempo, a menos que se pueda hacer una predicción real de la rigidez no lineal en el instante de tiempo del paso de integración, es necesario entrar en el proceso de iteración.

Los desarrollos más recientes se han enfocado en adaptaciones específicas de los métodos numéricos de integración implícitos para el método pseudodinámico. Durante los últimos años han sido desarrollados distintos procedimientos que se han aplicado directamente al desarrollo de pruebas pseudodinámicas, dentro de éstos, han emergido dos como los más ampliamente aceptados: (1) el Método- $\alpha$  (Shing, Vannan y Carter, 1991) basado en la integración Hilber- $\alpha$  (Hilber, Hughes y Taylor, 1977); y, (2) el algoritmo de Operador-Splitting (OS) (Nakashima, Kaminosono, Ishida y Ando, 1990).

Mosalam, White y Ayala (1998) realizaron pruebas pseudodinámicas empleando un proceso de predicción y corrección, utilizando el algoritmo implícito de Newmark desarrollado por Hughes, Pister y Taylor (1979). Es importante mencionar que estas investigaciones son parte fundamental en el desarrollo del presente trabajo.

Los experimentos realizados durante estos años muestran las ventajas de este método sobre otros existentes.

### **3.2.2.- Generalidades**

El método es similar a las pruebas cuasi-estáticas excepto que, la historia de desplazamientos a la que es sometida la estructura es calculada mediante una computadora en línea y durante el desarrollo del experimento, basándose en las características dinámicas de la

estructura misma; éstas son aplicadas al espécimen, idealmente, son muy parecidas a las que se desarrollarían si el modelo fuera probado dinámicamente (Mahin y Shing, 1985).

La historia de desplazamientos a imponer a la estructura se obtiene resolviendo la ecuación de movimiento que gobierna el sistema por medio de un método numérico implícito. A partir de la fuerza restauradora medida directamente del espécimen en el paso previo, de las características supuestas de inercia, del amortiguamiento evaluado en función de la masa y rigidez inicial (amortiguamiento clásico) y de la función de fuerza externa a la que es sometida la estructura, los desplazamientos son calculados e impuestos al espécimen por medio de actuadores hidráulicos. Es el mismo método utilizado en el análisis dinámico no lineal de estructuras con la diferencia que, en este caso, las propiedades de rigidez y por tanto de fuerza restauradora no son calculadas por medio de modelos matemáticos sino que son medidas directamente del modelo, con lo que se evitan las idealizaciones que se llevan a cabo en el modelado del comportamiento no lineal de los elementos y de la estructura misma.

La prueba pseudodinámica presenta ventajas sobre los experimentos realizados en mesa vibradora:

- 1.- Debido a que puede ser un proceso de carga y pausa, se pueden utilizar los equipos convencionales de medición usados en pruebas cuasi-estáticas, mientras que para mesa vibradora la medición debe ser simultánea y continua, dado que es un proceso continuo.
- 2.- Es económico por usar el equipo básico utilizado en las pruebas cuasi-estáticas comunes.
- 3.- Gracias a que utiliza el mismo equipo que en las pruebas cuasi-estáticas, es factible que este tipo de experimentación pueda ser llevada a cabo en muchos de los laboratorios existentes en los institutos de investigación.
- 4.- Se tienen condiciones experimentales muy bien controladas.

- 5.- Se generan las condiciones adecuadas para que se tenga una observación clara y detallada del comportamiento estructural del modelo durante la prueba, con lo que podemos identificar tipos de falla, el patrón de agrietamientos, etc.

El método pseudodinámico también presenta ventajas respecto a pruebas cuasi-estáticas:

- 1.- Se puede observar el comportamiento inelástico de parte del sistema de manera real, además, dicho comportamiento está siendo incluido en el proceso mediante el uso de los valores de fuerza medidos del espécimen en el cálculo de los desplazamientos a aplicar en pasos subsecuentes. Así, se dejan de lado parte de las incertidumbres que se generan al tratar de establecer cuál es el modelo más apropiado para representar el comportamiento inelástico de los elementos y las implicaciones que esto genera.
- 2.- Presenta una buena aproximación a la realidad ya que toma en cuenta las características dinámicas de la estructura y las del movimiento del terreno, con lo que la problemática de una representación adecuada de la historia de cargas o desplazamientos a aplicar al espécimen es eliminada.

Como todos los procedimientos existentes dentro del ámbito de la ingeniería sísmica, el método pseudodinámico también tiene algunas desventajas, a mencionar a continuación:

- 1.- Por las características de propagación de error en la integración numérica, requiere un control excelente de los actuadores así como tolerancias rígidas en cuanto al error experimental de desplazamiento y fuerza.
- 2.- El comportamiento no lineal sensible a la velocidad de deformación no puede ser reproducido sin una prueba pseudodinámica en tiempo real, es decir, que sea desarrollada completamente en un tiempo igual a la duración de la señal utilizada.

- 3.- Velocidad controlada y pequeños intervalos de integración para asegurar estabilidad numérica pueden causar tiempos excesivos de prueba.

### **3.2.3.- Formulación del método pseudodinámico**

El primer paso para implementar el método pseudodinámico es idealizar la estructura como un sistema discreto, el cual represente de manera adecuada el comportamiento global de la estructura por medio de unos cuantos grados de libertad. Enseguida, es necesario suponer las propiedades de inercia y de amortiguamiento. Una vez que se cuenta con las propiedades del modelo, formular el sistema de ecuaciones de movimiento.

Durante un experimento pseudodinámico no se recurre a la modelación del comportamiento de los elementos que integran la estructura, debido a que las fuerzas restauradoras del sistema son medidas directamente del espécimen a ensayar.

En el proceso, la estructura es desplazada y los desplazamientos reales y las fuerzas restauradoras son medidas directamente del modelo para su uso en los cálculos subsecuentes. Los desplazamientos, calculados por medio de una computadora conectada en línea en la que las ecuaciones diferenciales son resueltas por medio de algoritmos numéricos, son impuestos a la estructura por medio de actuadores servo-hidráulicos.

Al utilizar valores de fuerza y desplazamiento medidos directamente del modelo en la solución de la ecuación de movimiento, los efectos que pudieran generarse por algunos otros motivos como: aparición de articulaciones plásticas en algunos elementos o acortamiento de columnas, entre otros, y que influyen en el comportamiento global de la estructura, son considerados implícitamente dentro del proceso de integración. Así, es posible someter a experimentos pseudodinámicos estructuras que por sus características propias o por las de la excitación, pudieran tener un comportamiento complicado.

Estructuras con comportamiento no lineal complicado pueden ser ensayadas pseudodinámicamente. Dado que en este tipo de prueba los valores de fuerza y desplazamiento son obtenidos experimentalmente no es necesario llevar a cabo una evaluación de la rigidez del sistema y por tanto, las incertidumbres asociadas con este tipo de comportamiento son eliminadas.

Así, el esquema básico de la prueba pseudodinámica es presentado en la Figura 3.1

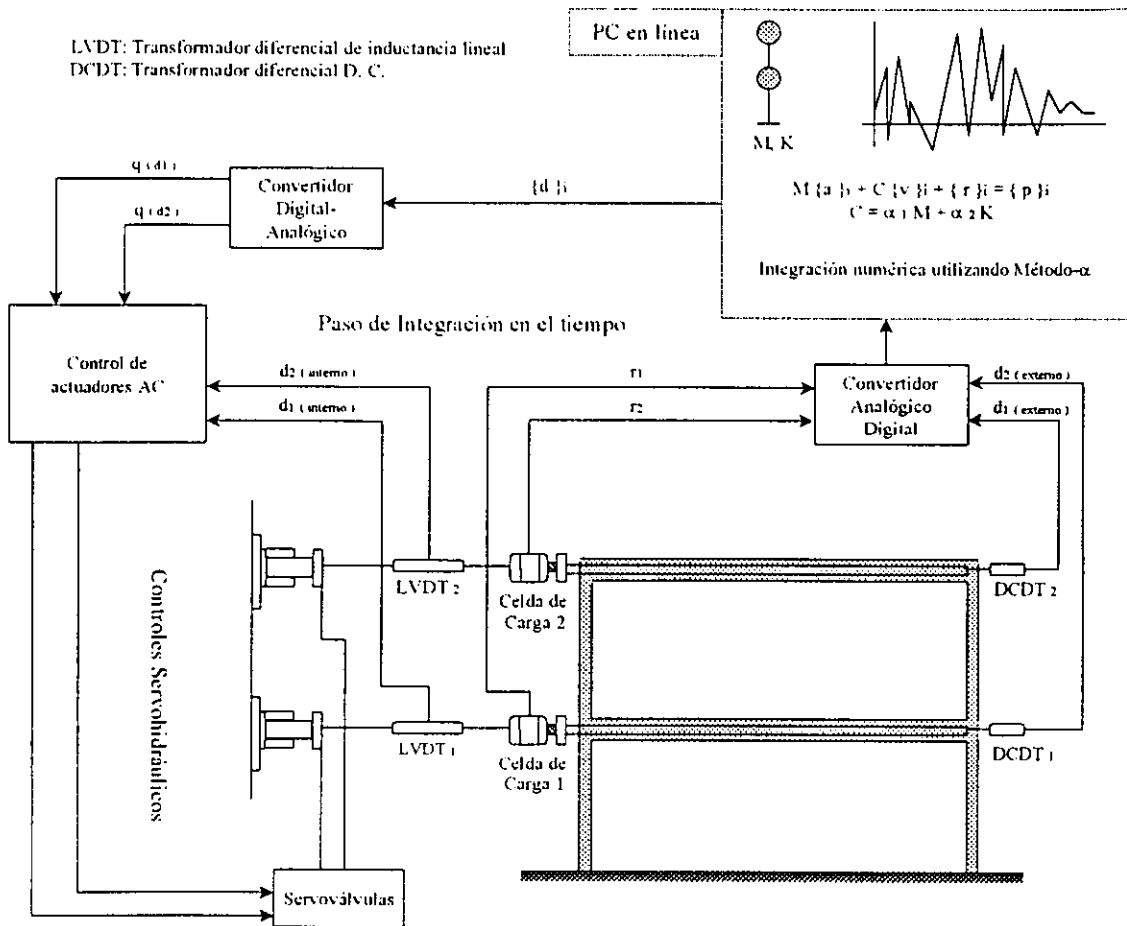


Fig. 3.1.- Esquema de experimento pseudodinámico.

El principio básico en la prueba pseudodinámica es, al igual que en muchos de los procedimientos de computadora de análisis dinámico, que el comportamiento dinámico de una

estructura puede ser representado de manera adecuada y con una gran precisión por medio de un modelo discreto – paramétrico que tiene un número finito de grados de libertad.

Existen ciertas clases de estructuras que no es conveniente que sean sometidas a ensayos pseudodinámicos debido a sus características o por la limitación del equipo existente en el laboratorio.

Dentro de este grupo se engloban aquellas estructuras que no pueden ser representadas de manera adecuada mediante un proceso de discretización; tal es el caso de algunas estructuras en las que, por su distribución uniforme de masa, no es posible representar el comportamiento global de la misma mediante un modelo discreto. Por tanto, en la medida en que el comportamiento global de una estructura pueda ser representado por unos cuantos grados de libertad en los que se aplicarán los desplazamientos y serán medidas las fuerzas, es factible que sea ensayada pseudodinámicamente.

Es importante tomar en cuenta que, estructuras en las que la distribución de masa pueda influir en el modo de falla local, no es conveniente que sean probadas por medio de experimentos pseudodinámicos.

Hablando de modelos tridimensionales, es posible llevar a cabo un experimento pseudodinámico sólo si se considera una sola componente de aceleraciones, mientras que la componente ortogonal es despreciada, esto se debe a las complicaciones con el equipo de laboratorio ya que no es posible inducir en la estructura el desplazamiento en una dirección sin afectar el equipo de medición que se encuentra colocado en la otra. Una posible solución para que puedan ser aplicados movimientos con dos componentes transversales entre sí es que sea utilizado un proceso similar al que aparece en los reglamentos de construcción, en los que se considera el valor total de la señal en una dirección mientras que en la dirección perpendicular se aplica solo un porcentaje de la misma señal. De esta manera es posible realizar el ensaye, sin embargo, dado que el desplazamiento será aplicado por un solo actuador, la estructura tiene que ser colocada con un ángulo determinado con respecto al sistema de reacción, de tal manera que, el desplazamiento

total aplicado en el centro de masa sea igual a la suma vectorial de las dos componentes ortogonales entre sí, correspondientes a 100% en una dirección y a un valor proporcional en dirección transversal a la primera. Cabe mencionar que para poder aplicar los desplazamientos con dicho ángulo y en el centro de masa se tendrá que recurrir a aditamentos especiales, situación que se debe de tomar en cuenta durante el proceso de calibración del equipo.

Por otro lado, la ecuación de movimiento de un sistema de varios grados de libertad puede ser representada, como se vio anteriormente, en términos de una familia de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden, escritas en forma matricial:

$$[M]\{\ddot{u}(t_{(i+1)})\} + [C]\{\dot{u}(t_{(i+1)})\} + \{R(t_{(i+1)})\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_s(t_{(i+1)}) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde  $[M]$  y  $[C]$  son la matriz de masas y de amortiguamiento;  $\{\ddot{u}(t_{(i+1)})\}$  y  $\{\dot{u}(t_{(i+1)})\}$  son los vectores de aceleración y velocidad del sistema, respectivamente;  $\{R(t_{(i+1)})\}$  es el vector de fuerzas restauradoras del sistema; y,  $\ddot{u}_s(t_{(i+1)})$  es la aceleración del terreno en el tiempo  $t_{(i+1)}$ .

Aunque los métodos implícitos utilizados en la solución de la ecuación de movimiento del sistema son a menudo superiores que los algoritmos explícitos, en términos de estabilidad y disipación numérica, su aplicación a pruebas pseudodinámicas ha sido limitada debido a consideraciones prácticas.

La principal preocupación es que los métodos implícitos generalmente requieren de un proceso iterativo para evaluar la respuesta de un sistema no lineal. Esto no solamente es ineficiente en cuanto al tiempo computacional se refiere, sino que también puede producir que durante el proceso de iteración la estructura sea desplazada más allá del punto en que se produce el equilibrio de la ecuación de movimiento, lo que conlleva a que incurse en rangos de deformación inelástica mayores. Al presentarse tal situación, la estructura estaría disipando energía por medio de histéresis, generando daño en la misma, situación que podría llevar a encontrar una respuesta totalmente diferente a la real. Haciendo referencia a dicha situación, el que, de aquí en adelante

será denominado “Punto de equilibrio”, es el desplazamiento para el cual, considerando cierta tolerancia de error, se establece el equilibrio en la ecuación de movimiento.

Por tal motivo, durante los últimos años se han creado métodos de integración implícitos incondicionalmente estables desarrollados de tal manera que se eviten sobrecargas indeseables en la estructura durante el proceso pseudodinámico.

Shing, Vannan y Carter (1991) propusieron el Método- $\alpha$ , basado en el algoritmo de Hilber y Hughes (1977). Dicho procedimiento consta, de igual forma que el método propuesto por Thewalt y Mahin, de una fase predictor y una fase correctora. Este método, ha diferencia del anterior, se basa en una corrección por medio de iteración numérica considerando la rigidez inicial de la estructura.

Para evitar sobrecarga y descarga indeseable durante la iteración, un factor de reducción (FR) es incluido con la finalidad de reducir tal posibilidad y, para proporcionar un índice de convergencia más o menos uniforme para todos los grados de libertad.

Para un sistema de múltiples grados de libertad, el Método- $\alpha$  establece:

$$M \ddot{u}_{i+1} + (1 + \alpha) C \dot{u}_{i+1} - \alpha C \dot{u}_i + (1 + \alpha) r_{i+1} - \alpha r_i = (1 + \alpha) f_{i+1} - \alpha f_i \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \Delta t^2 \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_i + \beta \ddot{u}_{i+1} \right] \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta t \left[ (1 - \gamma) \ddot{u}_i + \gamma \ddot{u}_{i+1} \right] \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Si se considera de la ecuación 3.3 que:

$$u_{i+1}^{Exp} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \Delta t^2 \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_i \quad (\text{Ec. 3.5})$$



se tiene:

$$\ddot{u}_{i+1} = (u_{i+1} - u_{i+1}^{Exp}) \frac{1}{\Delta t^2 \beta} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Sustituyendo la ecuación 3.6 en la 3.4 y en la 3.2, desarrollando algebraicamente y agrupando términos se obtiene:

$$\bar{M} u_{i+1} = \bar{M} \hat{u}_{i+1} - \Delta t^2 \beta (1 + \alpha) r_{i+1} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$\bar{M} \hat{u}_{i+1} = \bar{M} u_{i+1}^{Exp} + \Delta t^2 \beta [(1 + \alpha) f_{i+1} - \alpha f_i - C \dot{u}_i - (1 + \alpha)(1 - \gamma) \Delta t C \ddot{u}_i + \alpha r_i] \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$\bar{M} = M + (1 + \alpha) \gamma \Delta t C \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Como se puede observar en el desarrollo, la ecuación 3.8 representa la parte explícita de la solución ya que es definida en función de los valores obtenidos en los pasos previos, mientras que la ecuación 3.7 es la parte implícita del problema ya que el desplazamiento,  $u_{i+1}$ , es expresado en términos de la respuesta obtenida en los pasos anteriores así como por el valor de la fuerza restauradora,  $r_{i+1}$ , del paso en estudio. Debido a que la fuerza restauradora,  $r_{i+1}$ , depende del valor del desplazamiento,  $u_{i+1}$ , se convierte en un proceso iterativo.

Al considerar que  $u_{i+1}^{(k)}$  y  $r_{i+1}^{(k)}$  son el desplazamiento y la fuerza restauradora obtenidas durante el proceso en la iteración k, se puede establecer que:

$$\bar{M} u_{i+1}^{(k)} = \bar{M} \hat{u}_{i+1} - \Delta t^2 \beta (1 + \alpha) r_{i+1}^{(k)} + \bar{M} e_{i+1}^{R(k)} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

en la cual  $e_{i+1}^{R(k)}$  representa al error de convergencia. Sustrayendo la ecuación 3.10 de la 3.7:

$$\bar{M} (u_{i+1} - u_{i+1}^{(k)}) = -\Delta t^2 \beta (1 + \alpha) (r_{i+1} - r_{i+1}^{(k)}) - \bar{M} e_{i+1}^{R(k)} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

definiendo:

$$\Delta u_{i+1} = u_{i+1} - u_{i+1}^{(k)} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$\Delta r_{i+1} = r_{i+1} - r_{i+1}^{(k)} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

y, si  $K$  es la rigidez secante exacta para el incremento de desplazamiento,  $\Delta u$ , entonces se puede establecer que  $\Delta r_{i+1}^{(k)} = K \Delta u_{i+1}^{(k)}$ . Sustituyendo la relación anterior, así como las ecuaciones 3.12 y 3.13 en la ecuación 3.11:

$$\left[ \bar{M} + \Delta t^2 \beta (1 + \alpha) K \right] \Delta u_{i+1} = -\bar{M} e_{i+1}^{R(k)} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

donde:

$$K^* = \bar{M} + \Delta t^2 \beta (1 + \alpha) K \quad (\text{Ec. 3.15})$$

por lo tanto:

$$K^* \Delta u_{i+1} = -\bar{M} e_{i+1}^{R(k)} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Debido a que ni la rigidez secante ni la rigidez tangente de una estructura son implícitamente conocidas en una prueba pseudodinámica, en su lugar es tomada la matriz inicial de rigidez,  $K$ . Es importante mencionar que con la formulación mostrada arriba se asegura la convergencia numérica del procedimiento.

La implementación del procedimiento de solución para pruebas pseudodinámicas es mostrada en la Figura 3.2.

Como se muestra en esta figura, el procedimiento puede ser implementado con un control dual de desplazamientos, por medio del uso de transductores de desplazamiento externos e internos. Mientras que los desplazamientos medidos con los transductores externos, denotados con el superíndice "Ex", son usados para verificar la convergencia de la solución numérica, los transductores internos son usados para el control de los actuadores en el paso de carga. Esto se hace para prevenir que la deformación del muro de reacción que soporta los actuadores afecte los desplazamientos estructurales, evitando disturbios externos a los transductores usados en el control de la prueba, con lo que se evitan inclusion de deformaciones irreales dentro del proceso de experimentación.

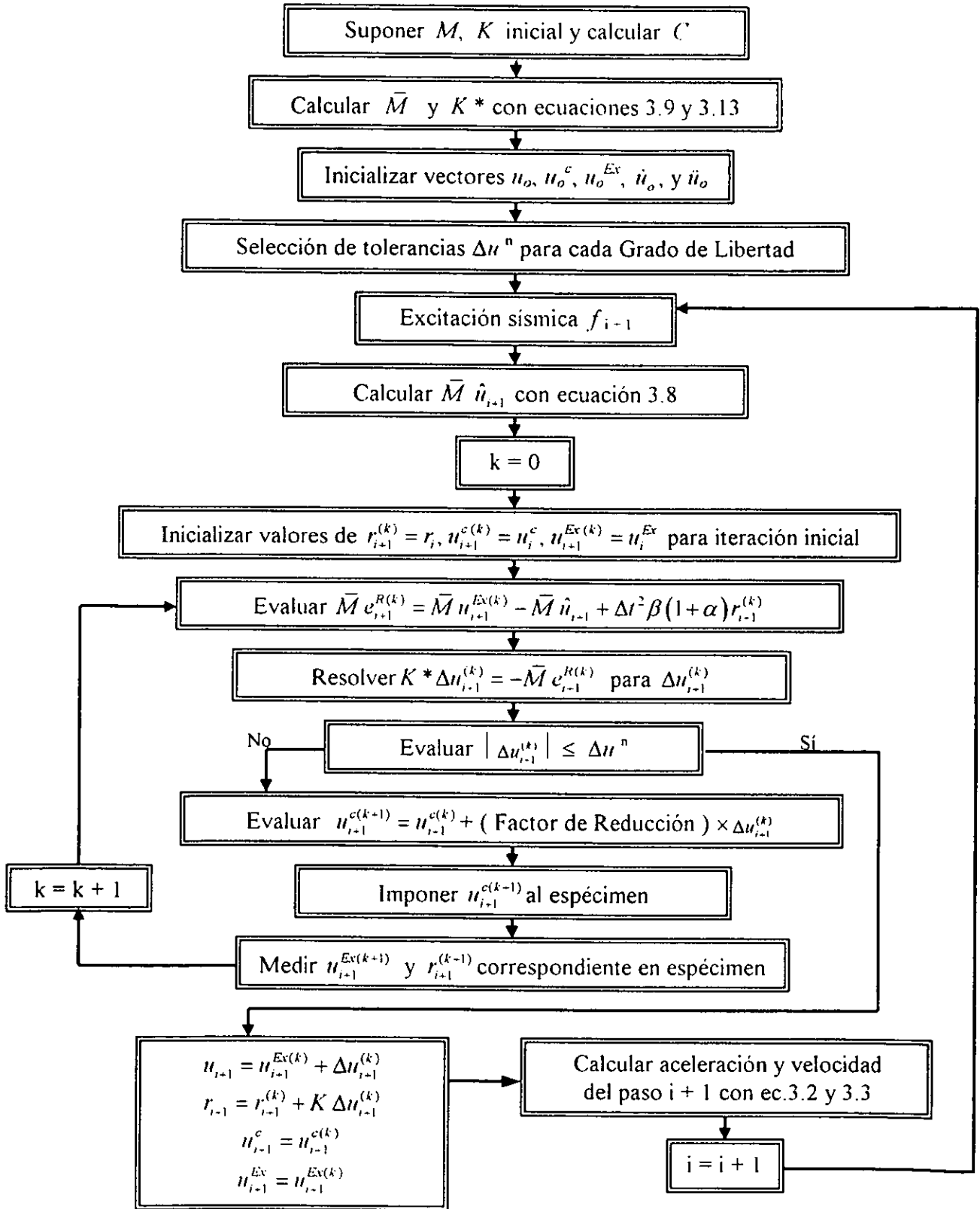


Fig. 3.2.- Implementación del método-α (Hilber y Hughes) para prueba pseudodinámica.

Así, los desplazamientos enviados por la computadora a los controladores analógicos, denotados por el superíndice "C", pueden ser diferentes de los desplazamientos de la estructura.

Para aplicar el procedimiento descrito en las páginas anteriores es necesario que la rigidez inicial del sistema,  $K$ , usada en el proceso de iteración sea más alta o por lo menos igual a la rigidez tangente actual de la estructura,  $K^m$ . Esta condición puede ser satisfecha fácilmente para la mayoría de las estructuras que presentan un comportamiento "suave", y es cuantitativamente definida cuando la condición  $\delta K = K - K^m$  sea positiva semidefinida.

Una de las principales preocupaciones al llevar a cabo un experimento pseudodinámico es el hecho de que la estructura no sea sobreesforzada debido a una deformación excesiva de la misma, es decir, que durante el proceso de iteración que se lleva a cabo en el cálculo del punto de equilibrio, para un instante de tiempo dado, se llegue al él sin haberlo sobrepasado en ningún momento, dado que si durante alguno de los pasos de la iteración la estructura se deforma más allá de tal punto se produciría, dentro del rango no lineal, disipación de energía por medio de histéresis mayor al que tendría realmente; y, el valor de fuerza restauradora a leer sería distinto del real.

Para sistemas de un grado de libertad, el cumplimiento de la condición de  $\delta K$ , establecida anteriormente, previene que se presenten desplazamientos que vayan más allá del punto de equilibrio y, por consiguiente, ciclos de carga y descarga irreales durante el paso de corrección. Además, elimina cualquier amortiguamiento negativo que pudiera ser inducido por errores de convergencia.

En lo referente a sistemas de múltiples grados de libertad, esta condición es necesaria pero no suficiente para eliminar por completo la posibilidad de sobrecargas, debido a que los sistemas de este tipo presentan un comportamiento más complejo. Además, la prevención de sobrecargas no previene necesariamente sobre-esforzar puntos específicos de una estructura de múltiples grados de libertad. Sin embargo, se ha mostrado en la literatura (Shing y Vannan, 1991), que siendo  $\delta K$  positiva semidefinida, se puede evitar amortiguamiento numérico negativo indeseable.

Para reducir las posibilidades de que durante la experimentación se presenten cargas y descargas indeseables, tanto en sistemas de un grado de libertad como en sistemas de múltiples grados de libertad, se incluye un factor de reducción dentro del procedimiento numérico.

El factor de reducción es aplicado a los incrementos de desplazamiento evaluados en cada paso de iteración, con lo que los incrementos de desplazamiento aplicados al espécimen son menores a los que se calcularon debido al desequilibrio de la ecuación de movimiento. De esta manera se busca que los desplazamientos aplicados a la estructura sean siempre menores a los requeridos para lograr el equilibrio del sistema en un instante de tiempo dado, evitando sobrecargas en la estructura.

Además, esto asegura un índice de convergencia más o menos uniforme para todos los grados de libertad del sistema en estudio.

El factor de reducción debe tener un valor entre 0 y 1. La selección de dicho valor influye directamente en el tiempo de ejecución de la prueba ya que si se selecciona un factor de reducción pequeño, cercano a cero, se tendrá una aproximación a la solución con un número grande de iteraciones, mientras que el seleccionar un factor de reducción grande, cercano a 1, el experimento tendrá una menor duración, incrementando el riesgo de sobrecargas. Es importante mencionar que se debe seleccionar un factor de reducción bastante pequeño de tal manera que se asegure que no se presentarán ciclos de carga y descarga irreales, pero que sea lo más grande posible para reducir el tiempo de ejecución del experimento.

Otro aspecto importante a mencionar: en el procedimiento utilizado se lleva a cabo una corrección numérica de los errores residuales, al sumar a los valores de equilibrio los valores del incremento de desplazamiento y fuerza restauradora calculados en la última iteración. El incremento de fuerza restauradora es aproximado debido a que en su cálculo se utiliza la rigidez inicial del sistema. Se ha encontrado en la literatura que con esta corrección se llega a resultados más aproximados a los reales, aún en comparación con el mismo procedimiento pero sin la fase final de corrección numérica de errores residuales.

### **3.3.- Método pseudodinámico, técnica de subestructuración**

Una de las principales generosidades del método pseudodinámico es su versatilidad, ya que con esta metodología se puede investigar la respuesta de estructuras planas y en tres dimensiones, puede ser usado para evaluar el comportamiento de estructuras tanto a pequeñas escalas como a grandes escalas, así como a subensambles estructurales y componentes.

Como se mencionó anteriormente, el método tiene limitantes; en lo referente a las limitaciones físicas de un experimento pseudodinámico, se puede mencionar el número y capacidad de los actuadores disponibles, así como las dimensiones y capacidad de carga de los sistemas de reacción (muro de reacción) que son usados para soportar el espécimen y los actuadores.

Cuando se tiene la necesidad de estudiar el comportamiento de estructuras sumamente grandes, los aspectos mencionados con anterioridad representan una gran limitante, además de que la elaboración de especímenes de tal magnitud sería poco práctico y antieconómico, pudiese parecer que el procedimiento pseudodinámico pierde toda su utilidad. Sin embargo, es importante recalcar que esto no es necesariamente cierto ya que se puede aplicar la técnica de la “Subestructuración”.

La técnica denominada “Subestructuración” o “Subensamble” es una variación del método pseudodinámico en la cual solo una parte de la estructura es probada experimentalmente, mientras que el resto de la misma es modelada de manera analítica dentro de la computadora en línea que controla el experimento.

Es muy útil en estructuras de múltiples grados de libertad, ya que es posible centrar el estudio experimental en uno o varios elementos seleccionados dentro del sistema, cuyo comportamiento es crítico, por el hecho de que el buen desempeño global de la estructura dependa de manera directa del adecuado funcionamiento estructural de los elementos seleccionados.

A menudo, el daño que una estructura sufre durante un evento sísmico es localizado en unas cuantas regiones críticas o subensambles. En dichos casos, no hay razón que justifique probar completamente el sistema estructural. Ante tal situación, se puede sacar ventaja del procedimiento pseudodinámico, probando experimentalmente solamente el subensamble crítico y modelando el resto de la estructura en una computadora.

Por ejemplo, si se considera un modelo de cinco niveles y dos crujeías, como el mostrado en la figura 3.3 (a), y solo interesa probar una sección crítica del modelo, la unión viga-columna interior, entonces, es posible implementar la técnica de la subestructuración, mostrada en la figura 3.3 (b).

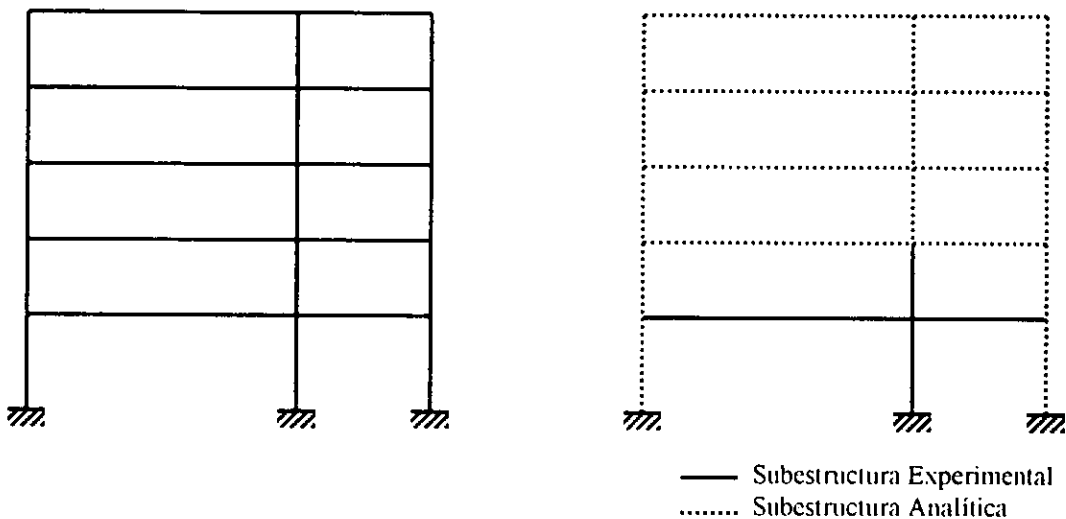


Fig. 3. 3.- Técnica con subestructuración. (a) Modelo (b) Subestructura a experimentar

Para derivar los desplazamientos o cargas correspondientes a las condiciones de frontera que son impuestos en la subestructura experimental, el resto del marco es modelado en una computadora conectada en línea.

Las ecuaciones de movimiento para la estructura completa y las fuerzas restauradoras pueden ser ensambladas en el análisis paso a paso de la estructura. Las respuestas de desplazamiento calculadas son impuestas a ambas subestructuras, experimental y analítica. Este

procedimiento fue desarrollado y aplicado por primera vez por Mahin (1985), y ha tenido un número prometedor de desarrollos en los últimos años como los desarrollados por Nakashima (1990, 1995); y, los desarrollados por Shing (1994) (Shing, Nakashima y Bursi, 1996).

Para extender el método implícito empleado en las pruebas pseudodinámicas a la técnica de la subestructuración, se puede adoptar un método dentro del cual, los puntos nodales son seccionados en dos subestructuras: la analítica y experimental. Así, la ecuación de movimiento de la estructura completa puede ser establecida de la forma:

$$\begin{bmatrix} M_{AA} & M_{AI} & 0 \\ M_{IA} & M_{II} & M_{IE} \\ 0 & M_{EI} & M_{EE} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_A \\ \ddot{u}_I \\ \ddot{u}_E \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{AA} & C_{AI} & 0 \\ C_{IA} & C_{II} & C_{IE} \\ 0 & C_{EI} & C_{EE} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_A \\ \dot{u}_I \\ \dot{u}_E \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r_A \\ r_I \\ r_E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_A \\ f_I \\ f_E \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

donde, los subíndices  $A$  y  $E$ , indican los grados de libertad dentro de las subestructuras analíticas y experimental, respectivamente; e  $I$ , denota los grados de libertad asociados con los nodos de la interface.

Las fuerzas restauradoras desarrolladas por las subestructuras respectivas son calculadas separadamente. Para ilustrar este proceso, consideremos una estructura que presente comportamiento elástico-lineal, para la cual la relación de fuerza-desplazamiento puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} K_{AA} & K_{AI} & 0 \\ K_{IA} & K_{II}^A + K_{II}^E & K_{IE} \\ 0 & K_{EI} & K_{EE} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_A \\ u_I \\ u_E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_A \\ r_I^A + r_I^E \\ r_E \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

donde:

$$\begin{aligned} r_I^A &= K_{IA} u_A + K_{II}^A u_I \\ r_I^E &= K_{II}^E u_I + K_{IE} u_E \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.19})$$



De esta manera, las fuerzas restauradoras totales en los grados de libertad de interface son obtenidas sumando las respectivas contribuciones  $r_i^A$  y  $r_i^E$ .

En una prueba pseudodinámica, los desplazamientos  $u_i$  y  $u_E$  son impuestos a la subestructura experimental por medio de actuadores, las fuerzas restauradoras resultantes,  $r_i^E$  y  $r_E$ , son medidas directamente del espécimen experimental, mientras que las fuerzas restauradoras  $r_i^A$  y  $r_A$ , desarrolladas por la subestructura analítica, tienen que ser calculadas por medio de modelos matemáticos.

Para generar una compatibilidad de desplazamientos consistente entre los subsistemas analíticos y experimental,  $r_i^A$  y  $r_A$  deben ser evaluadas con los desplazamientos de interface medidos de la subestructura experimental en lugar de utilizar los desplazamientos calculados.

Como podemos observar, las pruebas pseudodinámicas implementadas con la técnica de subestructuración tienen un futuro prometedor ya que, al solo probar experimentalmente un subsistema pequeño de la estructura, se reducen los costos por construcción de especímenes así como por equipo necesario para llevar a cabo el experimento.

Además, el realizar pruebas de grandes modelos en las que solo sea necesario probar experimentalmente el subsistema crítico, es de gran utilidad para estudiar el comportamiento de ciertos elementos o subestructuras en las que un comportamiento adecuado del mismo implique el correcto desempeño global de la estructura ante la acción de movimientos sísmicos severos.

Dentro del desarrollo de la ingeniería sísmica existen una gran cantidad de situaciones en las que se podría aplicar el método de subestructura, como por ejemplo, en la evaluación del comportamiento de aisladores de base, los cuales disipan energía y previenen la transmisión de fuerzas muy grandes a la superestructura; en este caso, los aisladores pueden formar parte del subsistema experimental mientras que la superestructura puede ser modelada analíticamente.

## CAPÍTULO 4

---

---

# *EQUIPO DE CONTROL DE PRUEBAS PSEUDODINÁMICAS*

---

---

## ***EQUIPO DE CONTROL DE EXPERIMENTOS PSEUDODINÁMICOS***

### **4.1.- Descripción general del equipo**

Para llevar a cabo una prueba pseudodinámica, como se mencionó con anterioridad, solo es necesario contar con el equipo con el que se realizan las pruebas cuasi-estáticas, existente en muchos de los laboratorios de estructuras alrededor del mundo.

Cabe mencionar que, debido a que este tipo de equipo está referido más hacia el aspecto electrónico, su manejo, descripción más detallada y conexión son parte de la rama de la electrónica, por lo que solo se mencionará el equipo y su funcionamiento de manera general, haciéndose énfasis en los aspectos que pueden generar errores durante el proceso de prueba y en los que se debe de tener sumo cuidado.

Así, el equipo para desarrollar la prueba pseudodinámica estará constituido por:

*1.- Computadora.-* Conectada en línea para llevar a cabo el control del experimento y, donde se desarrolla el procedimiento numérico de cálculo de incremento de desplazamiento a aplicar al modelo en estudio. Es necesario contar con el software que permita llevar a cabo el experimento pseudodinámico; dentro del mismo se deben de introducir las características que definan a la estructura a ser probada, inicializar los parámetros de control del equipo a utilizar en la prueba y los que definen los métodos y algoritmos utilizados dentro del proceso de integración, introducir datos generales para llevar a cabo el experimento.

*2.- Sistema de control de transductores y actuadores.-* Dentro de este sistema se engloban todas las herramientas necesarias para llevar a cabo la intercomunicación entre la parte experimental y la parte numérica de la prueba. Como los actuadores y transductores trabajan con señales de voltaje, es necesario contar con un convertidor Analógico-Digital que permita

establecer una relación entre los valores numéricos de desplazamiento o fuerza restauradora y los voltajes correspondientes. Dentro de este sistema se puede englobar la tarjeta de comunicación insertada en la computadora, la caja receptora de señales y, si es necesario, una caja de switches que nos permita aumentar el número de señales con que se trabaja. Dicho sea de paso, los componentes del sistema de control dependen del tipo de conexión a realizar, la cual, dependerá de un experto en electrónica.

3.- *Actuadores hidráulicos.*- Son las herramientas que permiten llevar a la estructura a un desplazamiento determinado. Reciben los valores del desplazamiento objetivo mediante una señal de voltaje, desplazando a puntos predeterminados de la estructura.

4.- *Transductores de desplazamiento.*- Dispositivos para medir el desplazamiento que ha tenido la estructura; envían una señal de voltaje al equipo de control, el cual se encarga de convertirla a valores digitales y los envía al proceso numérico que se lleva a cabo en la computadora central.

5.- *Transductores de carga.*- De igual forma que los transductores de desplazamiento, éstos, miden los valores de las cargas o fuerzas aplicadas al modelo, correspondientes a las fuerzas restauradoras.

Es primordial recalcar que, la exactitud del método depende en gran parte de la calidad y comportamiento del equipo utilizado, así como de su calibración; por lo tanto, es sustantivo tener cuidado en la selección de equipo y en su proceso de calibración.

#### **4.2.- Origen de errores**

Desde su nacimiento y, durante el desarrollo de experimentos pseudodinámicos, la principal preocupación de los investigadores es el control de los errores que se puedan generar en el proceso, ya que la acumulación de éstos, lleva a resultados completamente fuera de la realidad.

Debido a que en este tipo de experimentación se combinan procesos experimentales y numéricos, los errores dentro de ambos procesos pueden afectar de manera directa los resultados obtenidos.

#### **4.2.1.- Errores numéricos**

La parte numérica del método pseudodinámico utiliza rutinas de integración establecidas, en la que los errores pueden ser controlados de manera adecuada.

Un aspecto importante, en cuanto a los métodos de integración se refiere, es la estabilidad de los mismos, que en muchas ocasiones depende del valor de la frecuencia del modo más alto de la estructura en estudio, ya que en función de éste se establece el límite de estabilidad. Esto es importante en pruebas pseudodinámicas, ya que no es conveniente tener límites de estabilidad dentro de un desarrollo experimental. El Método- $\alpha$ , seleccionado para el estudio, tiene una gran ventaja sobre muchos de los procedimientos existentes dado que es incondicionalmente estable.

Además, se realiza una corrección del error numérico después de que se ha llegado al punto de equilibrio, con lo que de acuerdo a lo visto en la bibliografía, se obtiene una respuesta más cercana a la real.

Es importante mencionar como origen de error el valor establecido para la tolerancia permisible en la solución del algoritmo numérico. La tolerancia utilizada en la convergencia del algoritmo establece el límite superior en el error de desplazamiento permisible en cada paso de integración, aunque de manera conjunta, la resolución de los actuadores generalmente limita el valor dicha tolerancia. Por tal motivo, para un experimento determinado y para maximizar la resolución de los actuadores, el movimiento de los mismos y, por tanto la tolerancia, deben ser ajustados con base en un desplazamiento máximo esperado.

Las experiencias de pruebas pseudodinámicas realizadas, han mostrado que los errores numéricos son generalmente de magnitud mucho más pequeña que los de tipo experimental. Por

otro lado, los errores experimentales tienen influencia directa en el proceso numérico porque se incluyen en él a través de los valores de fuerza y desplazamiento medidos del espécimen que retornan al proceso numérico. Al utilizarse estos valores en el cálculo de los pasos subsecuentes, el error se va acumulando en cada instante de tiempo, generando al final una respuesta totalmente errónea.

#### **4.2.2.- Errores experimentales**

Ahora se revisan los errores que se pueden presentar durante el desarrollo de un experimento pseudodinámico y que están relacionados con el equipo utilizado.

##### *1.- Transductores de Medición.*

Los desplazamientos impuestos a la estructura y las fuerzas restauradoras desarrolladas son medidas por medio de transductores de desplazamiento y de carga, respectivamente. Éstos, son equipos electrónicos que relacionan las variaciones de desplazamiento o fuerza con cambios de voltaje. Un equipo perfecto generaría una relación lineal exacta. Dado que el valor de la fuerza medido por el transductor de carga es usado en el cálculo de la respuesta de desplazamiento, la exactitud de este equipo está relacionada directamente con el realismo de los resultados.

De acuerdo a los estudios realizados por Shing y Mahin (1984), los errores asociados con los transductores de desplazamiento son comúnmente causados por no linealidades exhibidas en las conversiones de desplazamiento a voltaje y mala calibración del equipo. Estos errores son, generalmente, de menor importancia si se utilizan equipos que cuenten con una resolución adecuada para la prueba a realizar y, si se lleva a cabo una calibración adecuada. La aproximación del control de desplazamiento y medición depende también de la correcta instalación del transductor, el cual debe ser instalado para medir el desplazamiento estructural y no el desplazamiento que tenga él mismo. Además, los efectos geométricos pueden llegar a ser importantes bajo la acción de grandes deformaciones.

Un transductor de carga bien diseñado y propiamente calibrado debe de generar buenos resultados. Sin embargo, las lecturas de los transductores pueden presentar errores si no son alineados correctamente. Los efectos de la geometría son, una vez más, importantes si se imponen grandes desplazamientos a la estructura, de tal manera que las fuerzas medidas difieran grandemente de la componente en la dirección de carga asumida.

## 2.- Sistema de control de actuadores.

La respuesta que el sistema de control tiene ante un comando de desplazamiento depende de la capacidad de la servo-válvula que maneja el actuador hidráulico y de la velocidad de ganancia de desplazamiento en el controlador, es decir, que tan rápido es desarrollado en la estructura el desplazamiento objetivo enviado al actuador. La ganancia de desplazamiento a desarrollar por el actuador es limitada por la capacidad de la servo-válvula.

Conocer la velocidad y forma en que el actuador induce el desplazamiento a la estructura es primordial, debido a que se debe establecer en el proceso, el instante en que se lleve a cabo la lectura de los parámetros a retornar al ciclo de integración (desplazamiento y fuerza restauradora desarrollados por el sistema). Para establecer el punto de lectura deberá manejarse una tolerancia de error, definida como:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} \leq \text{Error tolerable}$$

donde:  $\delta$  = Incremento de desplazamiento objetivo; y,  $\Delta\delta$  = Error de adquisición.

Así, al realizar la calibración del método con el equipo a utilizar en el experimento se debe establecer la velocidad de ganancia de desplazamiento y, tomando en cuenta el error de desplazamiento tolerable, determinar el momento en que se inicia la lectura de datos.

Si la ganancia es lenta, el sistema puede responder muy lentamente, situación que genera que el desplazamiento leído por los transductores al finalizar la rampa tenga un valor menor al objetivo, incluso fuera de la tolerancia establecida, situación representada en la figura 4.1.

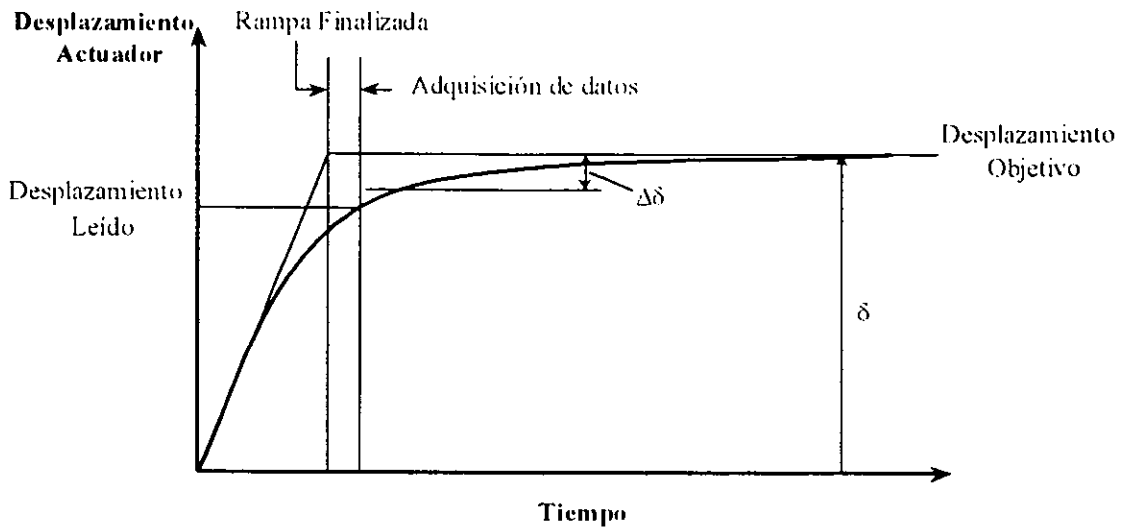


Fig. 4.1.- Ganancia de desplazamiento lenta.

Si la ganancia de incremento es muy alta, el sistema se puede tornar inestable, con lo que el actuador sobredesplazaría a la estructura y oscilaría alrededor del desplazamiento objetivo, ocasionando lecturas de desplazamiento diferentes de los desplazamientos requeridos, como se muestra en la figura 4.2.

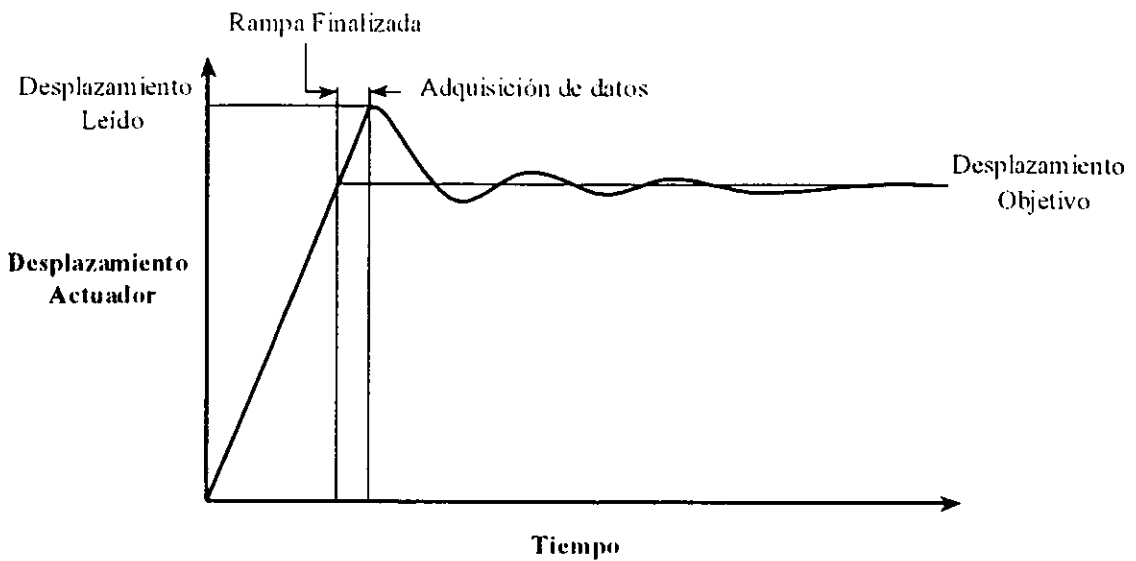


Fig. 4.2.- Ganancia de desplazamiento alta.



Ambas situaciones son indeseables en un experimento pseudodinámico porque, los valores erróneos tanto de desplazamiento como fuerza restauradora ingresan al proceso numérico que se está llevando a cabo de manera paralela en la computadora en línea. Así, pueden ocurrir errores acumulativos significativos en este tipo de experimentación si, en cada instante de tiempo se están introduciendo errores en los valores leídos.

De esta manera, una ganancia óptima debe de ser seleccionada de tal manera que la respuesta del actuador siga de manera cercana la señal enviada, para que, en función de la tolerancia de error ( $\Delta\delta/\delta$ ) establecida, se defina el punto de lectura de datos (Fig. 4.3).

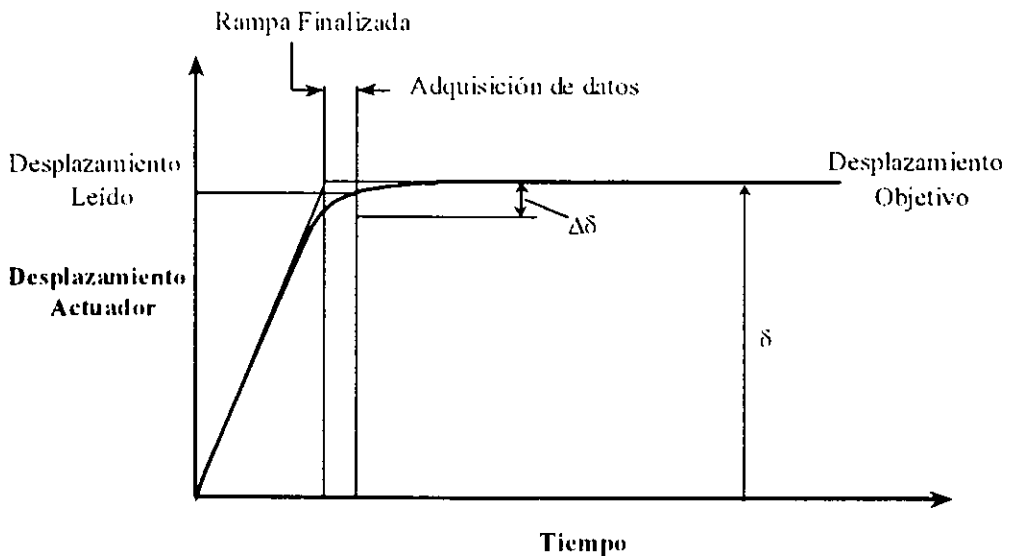


Fig. 4.3.- Ganancia de desplazamiento óptima.

### 3. Generador de rampa y unidad de adquisición de datos.

El generador de rampa es un convertidor Digital-Analógico el cual, transmite las ordenes de incremento de desplazamiento de la computadora a los controles de los actuadores. Dicho convertidor traslada los valores calculados dentro del proceso numérico a señales de voltaje. La resolución de estos convertidores depende de las características propias del equipo. Al estar establecido el rango de resolución para estos equipos, se generan pérdidas de exactitud por redondeo de los valores leídos, en otras palabras, los incrementos de desplazamiento menores que

el límite de resolución son perdidos en la transferencia de datos. Este error de resolución puede ser significativo si, los desplazamientos máximos calibrados son sustancialmente mayores que los que serán impuestos.

Para un experimento de un sistema con múltiples grados de libertad se requiere de un generador de rampa multicanal. Sin embargo, todas las rampas deben de iniciar y terminar simultáneamente.

La unidad de adquisición de datos es un convertidor Analógico-Digital el cual, traslada los datos analógicos, desplazamientos y fuerzas restauradoras, tomados de los instrumentos de medición a señales digitales que son retomadas por la computadora principal. Los errores en el control de lecturas de desplazamiento y fuerza restauradora son introducidos al proceso numérico.

Por tanto, para reducir los efectos de errores de resolución, se debe:

- 1.- Calibrar los instrumentos con los valores cercanos a los máximos que podrían esperarse durante el experimento; y,
- 2.- Evitar el truncado de los valores durante el proceso de integración y en las conversiones de señales analógicas a digitales.

Los efectos de errores de instrumentación en un experimento pseudodinámico pueden ser significativos, por tanto, se deben de seguir buenas técnicas de instrumentación y un cuidadoso procedimiento para verificación de errores.

## CAPÍTULO 5

---

---

# *PROGRAMA DE CONTROL DE PRUEBAS PSEUDODINÁMICAS*

---

---

## ***PROGRAMA DE CONTROL DE EXPERIMENTOS PSEUDODINÁMICOS***

Como se vio en capítulos anteriores, durante la realización de una prueba pseudodinámica, el experimento es controlado por una computadora que se encuentra conectada en línea. En ésta se lleva a cabo el proceso numérico dentro del cual, en función de la ecuación de equilibrio dinámico del sistema, es calculada la respuesta de desplazamientos a aplicar al espécimen.

Para definir los parámetros del algoritmo a utilizar, las características dinámicas de la estructura y del equipo, así como realizar los cálculos correspondientes, es necesario contar con un programa que permita controlar adecuadamente el experimento.

En la búsqueda de crear herramientas sencillas de utilizar en el desarrollo de la ingeniería, y, tratando de utilizar los beneficios que brindan los avances computacionales, el programa de control de la prueba pseudodinámica fue elaborado en Visual Basic versión 5.0, ya que dicho lenguaje, al trabajar bajo ambiente Windows, permite establecer un proceso interactivo, entre programa y usuario.

El programa de control de pruebas pseudodinámicas desarrollado fue denominado "PSD".

Con alrededor de 120 subrutinas, PSD permite controlar de manera adecuada el experimento; al utilizar un formato interactivo proporciona un ambiente de trabajo amigable, donde, la introducción de datos y ejecución son sumamente sencillas, además, la visualización del desarrollo del experimento es clara al realizarse en forma gráfica y durante el desarrollo del mismo.

Una de las ventajas de PSD es que no se realizó para un modelo en especial, sino que se trató de dar generalidad a su uso, creando un programa que pueda ser utilizado en la experimentación de diversidad de modelos.

Los registros sísmicos, por lo general, están formados por un conjunto de datos sumamente grande; por tanto, uno de los aspectos importantes a tratar cuando en un programa se lleva a cabo un análisis paso a paso es la limitación de memoria disponible en la computadora. Para evitar este tipo de problemas PSD está desarrollado de tal manera que en lugar de utilizar grandes arreglos de valores, crea arreglos sencillos y pequeños, actualizándolos en cada paso con los valores correspondientes al intervalo de tiempo en estudio.

PSD trabaja con el algoritmo de integración denominado Método- $\alpha$  que presenta características adecuadas para realizar experimentos pseudodinámicos, aplicando la formulación establecida en el capítulo 3 para este tipo de experimentación. Dicho procedimiento depende de manera directa de los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , con valores que son definidos al inicio del ensaye y que permanecen constantes durante el mismo; sin embargo, pueden variar de un experimento a otro, sin necesidad de modificar las rutinas existentes.

Dentro del programa se establece un control de desplazamientos dual que nos permite eliminar los errores que se pudieran presentar por efecto de agentes externos al experimento como lo es la deformación del muro de reacción en donde son colocados los actuadores.

En cuanto a las características propias de la estructura, solo es necesario establecer las matrices de masas y rigidez correspondientes al sistema en estudio, mientras que la matriz de amortiguamiento del sistema es determinada dentro de PSD, utilizando el amortiguamiento clásico de Rayleigh, estudiado en capítulos anteriores. Para poder calcular la matriz de amortiguamiento del sistema es necesario conocer los valores de los parámetros  $a_0$  y  $a_1$  (Ec.1.18), correspondientes al factor de proporcionalidad de masa y rigidez, respectivamente. Dichos factores dependen de los valores de las frecuencias del sistema, por tanto, se incorporó una rutina que permite conocer las frecuencias y modos de vibrar del sistema a estudiar.

Dado que el proceso pseudodinámico es un proceso de carga-pausa-carga, PSD cuenta con dos formas de controlar el experimento; la primera de ellas se da mediante el avance paso a

paso, es decir, el experimento se detiene en cada instante de tiempo; y, la segunda, mediante la evaluación de un intervalo de tiempo deseado.

Durante la realización del experimento se tiene una visualización gráfica del desarrollo del mismo; se despliegan en pantalla la historia de desplazamientos y la relación de cortante contra desplazamiento relativo para cada grado de libertad.

Los resultados finales son almacenados en archivos de datos, generando uno por cada grado de libertad. Estos archivos contienen las historias de desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza restauradora, desplazamiento relativo y cortante. Los resultados pueden ser visualizados de manera gráfica dentro de PSD.

Con el estado actual del programa PSD solo es posible ensayar aquellas estructuras en las que se consideren como grados de libertad desplazamientos horizontales de masas concentradas.

Adicionalmente, es necesario que sea posible medir experimentalmente las fuerzas asociadas a los grados de libertad considerados ya que en él, se requiere que las fuerzas generadas en el modelo sean medidas directamente del espécimen para que sean incorporadas en el proceso de integración. Si se consideran grados de libertad en los que las fuerzas no puedan ser medidas directamente del espécimen se tendrán que introducir al programa de control modelos de comportamiento que permitan conocer las fuerzas asociadas a ellos. Tal situación puede ser catalogada como un experimento pseudodinámico utilizando la técnica de la subestructuración.

Así, es importante establecer, que para llevar a cabo experimentos pseudodinámicos controlados por el programa PSD, se debe de contar con estructuras que puedan ser representadas adecuadamente por medio de un modelo discreto y que en los grados de libertad considerados sea posible llevar a cabo mediciones de fuerza y desplazamiento.

A continuación se dará, de manera general, una explicación del procedimiento a seguir para poder realizar una prueba pseudodinámica controlada por el programa PSD.

- 1.- Introducir las matrices de masas y rigidez del sistema a ensayar. Ambas matrices deben ser asociadas a los grados de libertad a ser probados experimentalmente.
- 2.- Definir los parámetros a utilizar durante el experimento: nombre del ensaye, valores para  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  que controlan algoritmo de integración, tolerancias de error permisibles durante el proceso de equilibrio de la ecuación dinámica, valores del porcentaje de amortiguamiento crítico, etc.
- 3.- Al ser establecidos los datos de la estructura y de los parámetros que controlan el experimento, se procede a calcular la matriz de amortiguamiento. Para evaluar dicha matriz es necesario conocer los valores de las frecuencias de la estructura, por lo que, durante este proceso son calculadas las frecuencias y formas modales del sistema.
- 4.- Aceptar los parámetros de calibración del equipo a utilizar.
- 5.- Seleccionar la señal del sismo a utilizar durante el experimento pseudodinámico. Si se utiliza un registro distinto a los que se incluyen en PSD, establecer sus características.
- 6.- Ejecutar el procedimiento pseudodinámico. Existen, como se mencionó anteriormente, las opciones de ejecución paso a paso o de intervalos de tiempo. Se visualizan las ventanas en que se presenta la historia de desplazamientos y la relación cortante-desplazamiento relativo durante el desarrollo del experimento.
- 7.- Una vez concluido el experimento pseudodinámico, los resultados pueden ser desplegados en pantalla, presentándose historias de desplazamiento, velocidad y aceleración, así como relaciones de cortante-desplazamiento para cada uno de los grados de libertad en estudio.

Aquí solo se menciona una breve revisión del programa de control, para mayor información de su utilización referirse al apéndice A, en donde se presenta el manual del usuario.

## CAPÍTULO 6

---

---

# *EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTROL*

---

---



## EJEMPLOS DE APLICACIÓN

### 6.1 Sistemas lineales

Para la validación numérica del programa de control de experimentos pseudodinámicos (PSD), se elaboró una rutina que, al evaluar las fuerzas restauradoras, hace las veces del modelo a probar experimentalmente. Dicha herramienta fue desarrollada para corroborar que, tanto el procedimiento utilizado, como todas las rutinas incorporadas al programa de control, funcionan de manera adecuada, sin la necesidad de contar con un modelo físico de la estructura a considerar en el análisis.

Esta rutina se creó de tal manera que se representa el proceso que se lleva a cabo durante el desarrollo de un experimento pseudodinámico.

Dentro esta herramienta se establecieron subrutinas que simulan numéricamente el control dual de desplazamientos, internos y externos. Además, evalúan las fuerzas restauradoras correspondientes a los desplazamientos.

Los desplazamientos internos representan los datos calculados mediante el procedimiento analítico; y, los externos, los que se presentarían de manera real y a los que se asocian las fuerzas restauradoras desarrolladas por el espécimen de prueba.

Por efecto de exactitud del equipo de prueba a ser utilizado, existe una diferencia entre los desplazamientos objetivo enviados para ser aplicados al modelo (internos) y los realmente desarrollados por el mismo. Dicha diferencia fue tomada en cuenta al evaluar los desplazamientos externos.

Una vez que los desplazamientos externos han sido medidos se procede al cálculo de la fuerza restauradora del sistema. Cabe mencionar que lo importante en este proceso es la

validación numérica del programa PSD y no el comportamiento histerético del sistema, por lo que en el cálculo de las fuerzas restauradoras no se consideraron modelos que representen de manera real el comportamiento no lineal de los elementos y, en este caso, se limitó al uso de un modelo completamente elástico-lineal.

Con base en la herramienta elaborada, para la validación de los algoritmos se evaluaron sistemas de uno y varios grados de libertad, con el fin de tomar en cuenta la variación de procesos utilizados por PSD durante el cálculo, entre uno y otro tipo de sistema.

Dado que los primeros análisis fueron realizados para sistemas de 1GDL, los resultados obtenidos con el programa PSD fueron comparados con el NONLIN. Más tarde, se optó por comparar los sistemas de MGDL con el DRAIN 2DX, dado que el NONLIN es exclusivamente para sistemas de 1GDL.

Para llevar a cabo la evaluación de los sistemas de uno y varios grados de libertad en este estudio se seleccionó un registro que ha sido ampliamente utilizado en nuestro país. La señal utilizada es la del sismo del 19 de septiembre de 1985, registrada en la SCT en la ciudad de México. Dicha señal presenta las siguientes características: duración de 180 s., intervalos de digitización a cada 0.02 s., aceleración máxima de 0.17g a los 58.10 s. El registro es mostrado en la figura 6.1.

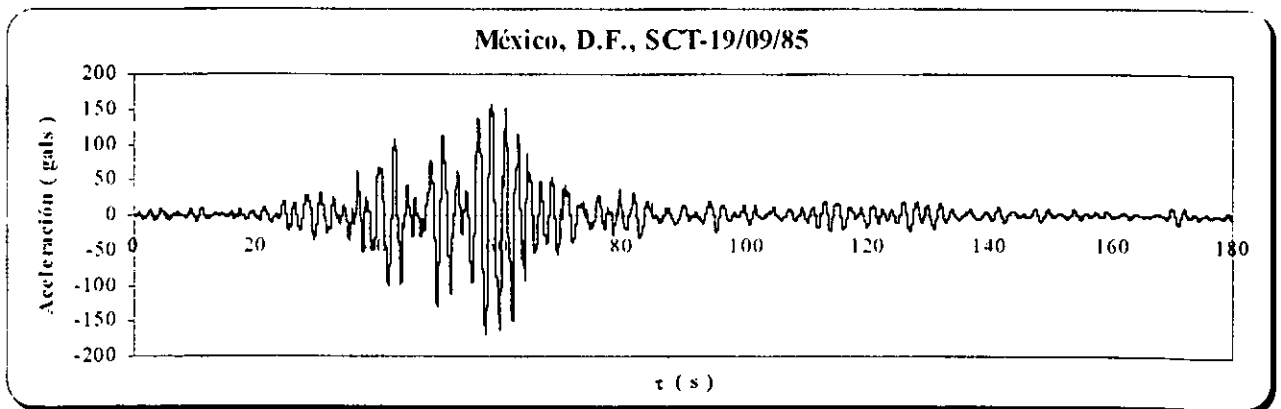


Fig. 6.1.- Registro SCT. 19 de septiembre de 1985. México, D.F.

### 6.1.1 Sistema de un grado de libertad

Para la validación del algoritmo, en el caso de sistemas de un grado de libertad, se seleccionó un sistema representativo de una masa concentrada sobre una columna con rigidez establecida y amortiguamiento viscoso. El sistema para el cual fue evaluada su respuesta se muestra en la figura 6.2.

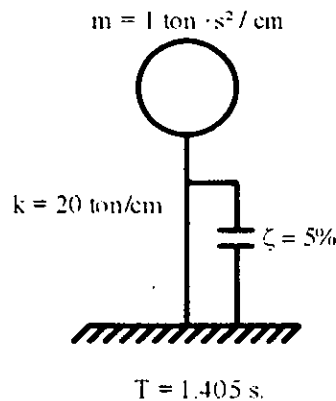


Fig. 6.2.- Sistema de un grado de libertad evaluado.

Para llevar a cabo el análisis del sistema mostrado en la fig. 6.2, dentro del programa pseudodinámico (PSD), se utilizaron los siguientes parámetros:

1.- El método- $\alpha$ , como se estableció con anterioridad, es controlado por tres distintos parámetros,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ;  $\gamma$ , como se mencionó en el capítulo 2,  $\beta$  y  $\gamma$  dependen del valor establecido para  $\alpha$ . Investigaciones desarrolladas por Hilber, Hughes y Taylor (1977) muestran que, para que el algoritmo sea incondicionalmente estable,  $\alpha$  debe tomar un valor entre 0 y  $-1/3$ ; sin embargo, con un valor igual a  $-1/3$  el algoritmo es más aproximado. Por tanto, para el presente desarrollo se seleccionaron los siguientes valores:

$$\alpha = -0.33 \quad \beta = 0.4422 \quad \gamma = 0.83$$

2.- El factor de reducción, FR, utilizado fue 0.8. Dicho valor fue seleccionado para corroborar que al aplicar el factor de reducción el algoritmo trabaja correctamente, no quiere decir que dicho valor sea el recomendado para un tipo especial de modelo.

3.- Un punto importante a tomar en cuenta durante el desarrollo del experimento es la tolerancia de error permitida durante el cálculo del punto de equilibrio. El valor seleccionado dependerá de las características del equipo de prueba a utilizar. Es vital que se seleccione un valor que permita controlar adecuadamente la propagación del error experimental. Para la valoración de la respuesta del sistema de un grado de libertad se seleccionó una tolerancia de error igual a 0.00001 cm.

Las dos respuestas son comparadas en la figura 6.3, que se muestra a continuación.

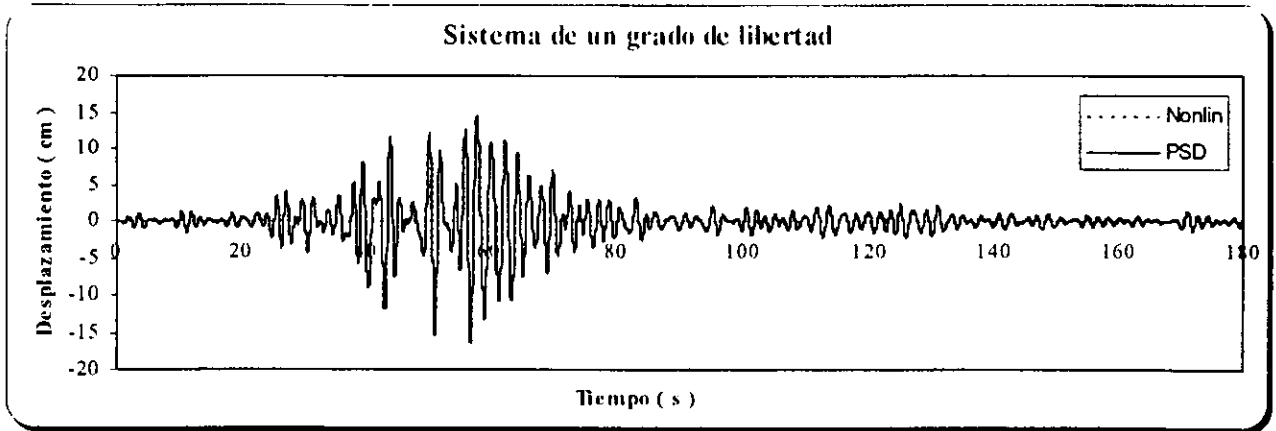


Fig. 6.3.- Historia de desplazamientos del sistema de un grado de libertad

De la figura 6.3 se puede concluir que, dado que ambas respuestas se sobreponen, el procedimiento y las rutinas utilizadas dentro de PSD trabajan de manera adecuada y correcta.

Cabe mencionar que se realizó el análisis de diversos sistemas, presentando todos la misma condición.

### 6.1.1 Sistema de múltiples grados de libertad

La validación de las rutinas utilizadas para la evaluación de sistemas de múltiples grados de libertad se llevó a cabo mediante el análisis de un modelo de dos niveles y una cruzija, mostrado en la figura 6.4.

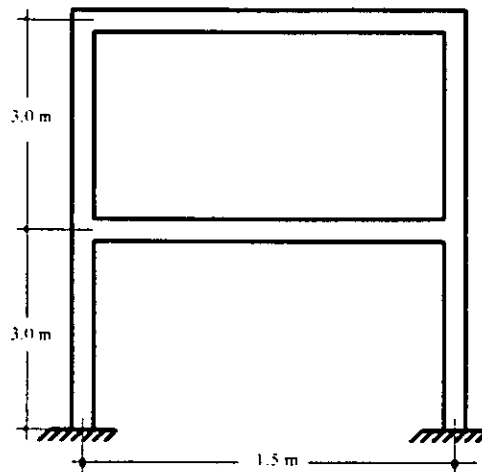


Fig. 6.4.- Modelo de múltiples grados de libertad evaluado.

En el diseño sísmico de la estructura mostrada en la figura 6.4 se utilizó Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, considerando, para el análisis ante cargas laterales, el procedimiento estático simplificado que aparece en el código; el mismo código establece los valores de las cargas vivas para un edificio de oficinas de  $250 \text{ kg/cm}^2$  para análisis gravitacional y de  $180 \text{ kg/cm}^2$  para análisis sísmico.

Nivel	Masa ( $\text{ton}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ )	Carga Muerta ( $\text{ton}/\text{m}$ )	Carga Viva ( $\text{ton}/\text{m}$ )	Carga lateral ( ton )
Inferior	3.26	3.83	1.5	1.97
Superior	3.19	3.72	1.5	3.85

Fig. 6.5.- Masas y cargas para análisis del modelo.

Con los valores obtenidos y, considerando los factores de carga correspondientes, se llevó a cabo el análisis y diseño de los elementos, utilizando una resistencia del concreto igual a 250 kg/cm<sup>2</sup> y del acero de refuerzo de 4200 kg/cm<sup>2</sup>. De esta manera, se determinaron las secciones transversales finales que aparecen en la figura 6.6, con resistencias listadas en la figura 6.7, obtenidas con un programa para calcular relaciones  $M-\phi$  y diagramas de interacción.

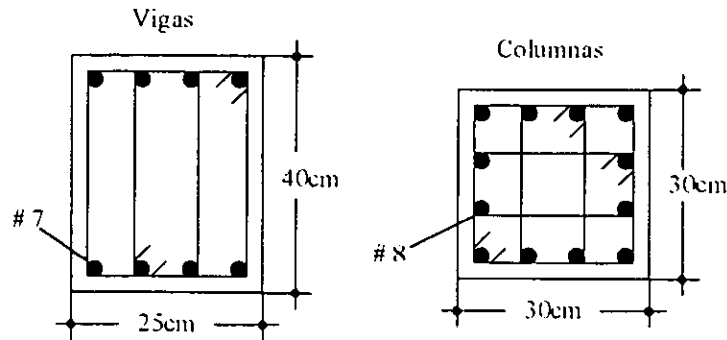


Fig. 6.6.- Secciones y armado de elementos del modelo.

Elemento	$M$ (ton-m)	$M^{Bal}$ (ton-m)	$P^{Tension}$ (ton)	$P^{Comp}$ (ton)	$P^{Bal}$ (ton)
Vigas	20.75	-	-	-	-
Columnas	21.70	25.41	255	408	58.58

Fig. 6.7.- Resistencias de elementos.

Este marco fue modelado y analizado con uno de los programas más utilizados para análisis no lineal, el DRAIN 2DX, aunque en este caso la estructura presenta una respuesta dentro del rango de comportamiento lineal. Los resultados fueron comparados con los obtenidos con PSD.

A diferencia del DRAIN 2DX, en donde el modelo es analizado de manera integral explícita, es decir, se tiene que dar ubicación de nodos, elementos, propiedades de cada uno de ellos, etc., dentro del PSD, toda esta información está incluida de manera implícita dentro de las matrices de masa y rigidez que representan a la estructura.

Como se mencionó anteriormente, los modelos a ser probados con PSD deben de tener sus masas concentradas en los grados de libertad a analizar. Por tanto, para el modelo en estudio, se consideró masas concentradas en los niveles del sistema. Así, la matriz de masa del sistema queda definida como:

$$[M] = \begin{bmatrix} 3.26 & 0 \\ 0 & 3.19 \end{bmatrix} \quad (\text{ton-s}^2 / \text{m})$$

De acuerdo a las características y propiedades de las secciones, así como la configuración de los elementos obtenemos la matriz de rigidez global. Para la ejecución del PSD se llevó a cabo una condensación estática, obteniendo la matriz de rigidez lateral del modelo, la cual asocia los grados de libertad que serían desplazados por medio de los actuadores. La matriz de rigidez lateral del modelo a analizar es:

$$[K] = \begin{bmatrix} 2511.83 & -1192.79 \\ -1192.79 & 1075.65 \end{bmatrix} \quad (\text{ton} / \text{m})$$

Además, al llevar a cabo la ejecución de PSD se estableció:

1.- Para ver la aproximación del Método- $\alpha$  con valores cercanos al rango establecido por Hilber y colaboradores (1977), el valor de  $\alpha$  seleccionado fue -0.3.

$$\alpha = -0.3 \qquad \beta = 0.4425 \qquad \gamma = 0.8$$

2.- El porcentaje de amortiguamiento crítico para ambos modos,  $\zeta$ , igual a 5%. Este valor se encuentra entre los recomendados para concreto reforzado (Bazán y Meli 1998).

3.- El factor de reducción, FR, a aplicar a los desplazamientos se seleccionó igual a 0.9. Es importante mencionar que el valor de dicho factor cambio del utilizado en el sistema de IGDL con el único fin de sensibilizarse en su uso.

4.- Para la valoración de la respuesta del sistema de varios grados de libertad se seleccionó una tolerancia de error igual a 0.00001 cm.

Al ejecutar PSD se obtuvieron los siguientes resultados:

Propiedades de amortiguamiento del sistema.

$$[C] = \begin{bmatrix} 8.594 & -2.804 \\ -2.804 & 5.159 \end{bmatrix} \quad (\text{ton-s/m})$$

Las frecuencias y eigenvalores del modelo son listados en la figura 6.8.

Modo	T (s)	$\omega$ (rad/s)	$\Phi$
1	0.562	11.188	{ 0.2754, 0.4857 }
2	0.200	31.340	{ 0.4805, 0.2784 }

Fig. 6.8.- Frecuencias y modos de vibrar del modelo.

La historia de desplazamientos para los niveles del modelo en estudio obtenida es presentada con la respuesta obtenida del DRAIN 2DX en la figura 6.9, con la finalidad de comparar ambas respuestas. Además, para poder visualizar de una manera más adecuada las dos respuestas, en la figura 6.10 se muestra un detalle de la parte crítica del movimiento (40 a 70 s.).

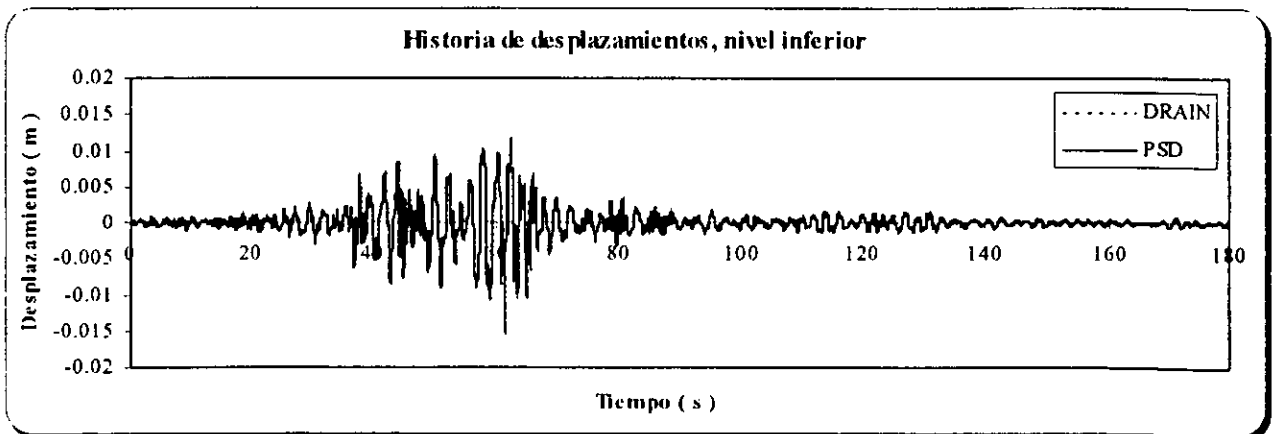


Fig. 6.9.- Historia de desplazamientos del modelo de dos grados de libertad.



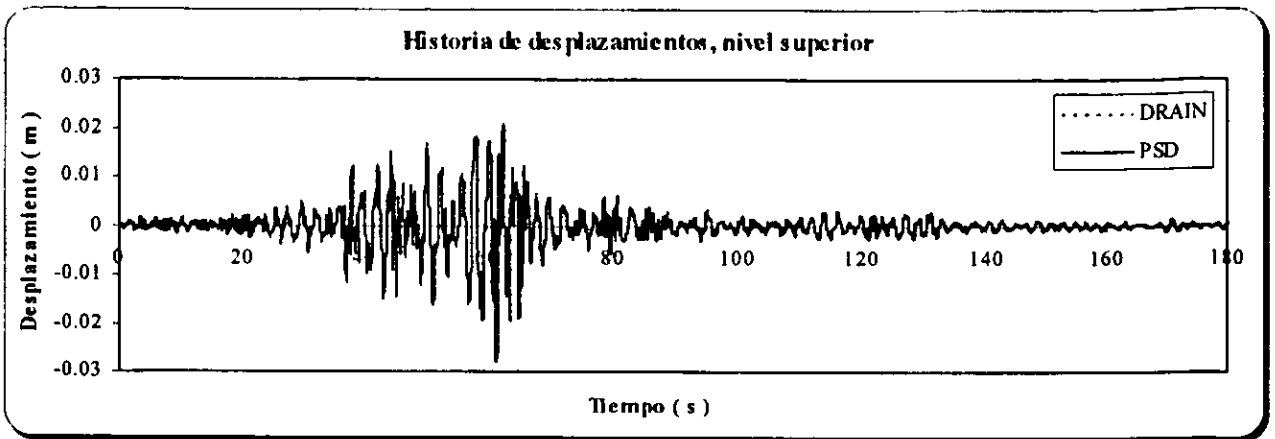


Fig. 6.9.- Historia de desplazamientos del modelo de dos grados de libertad. (continuación)

Al observar las figuras 6.9 y 6.10 se puede corroborar que las respuestas son prácticamente iguales para ambos programas, con lo que establecemos que el algoritmo empleado y las subrutinas implementadas en el PSD para el análisis de sistemas de varios grados de libertad trabajan de manera correcta.

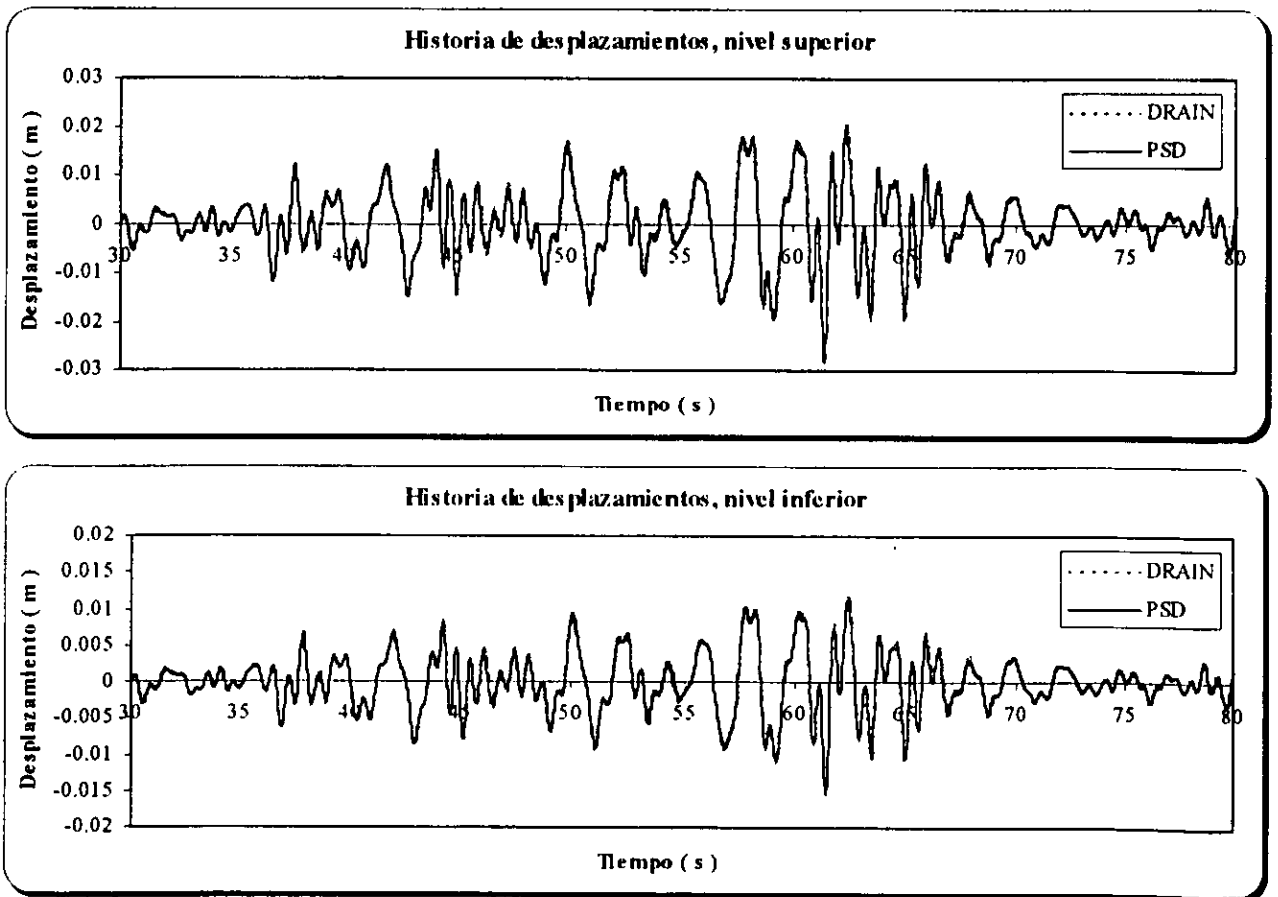


Fig. 6.10.- Detalle de respuesta del modelo.

## 6.2.- Sistema no lineal

Para validar los algoritmos utilizados en PSD en un modelo con comportamiento inelástico se llevó a cabo una simulación numérica basada en la respuesta de un sistema de un grado de libertad analizado con el NONLIN.

El modelo analizado y su comportamiento inelástico son mostrados en la figura 6.11.

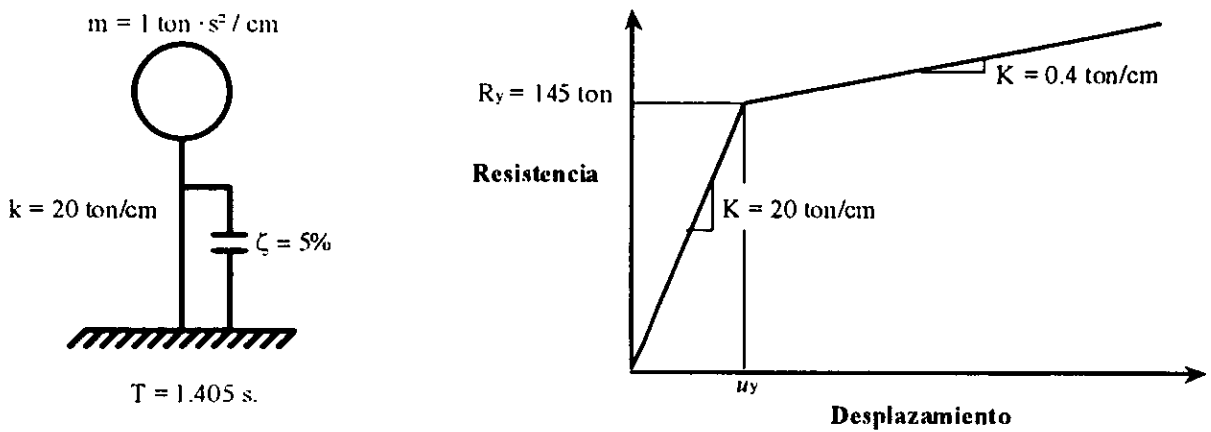


Fig. 6.11.- Modelo de un grado de libertad con comportamiento no lineal.

Como se observa, el modelo analizado es similar al que se evaluó linealmente, con los mismos valores de rigidez, masa y porcentaje de amortiguamiento crítico, sin embargo, en este caso, se representa el comportamiento no lineal del sistema por medio de una relación desplazamiento-resistencia bilineal.

Para establecer la resistencia de fluencia del modelo se utilizó como criterio que el sistema fuera capaz de desarrollar un factor de ductilidad ante el sismo de análisis. El factor de ductilidad considerado es de 4.

La rigidez post-fluencia seleccionada representa el 2% de la rigidez inicial del sistema.

Además, se establecieron los parámetros de control del algoritmo de integración, dentro del rango definido en el capítulo 2, de la siguiente manera:

1.- Parámetros de control del algoritmo de integración, Método- $\alpha$ :

$$\alpha = -0.3 \qquad \beta = 0.4425 \qquad \gamma = 0.8$$

2.- El factor de reducción, FR, se seleccionó igual a 0.6. De igual manera, se empleó dicho valor para sensibilizarse con la utilización del factor de reducción dentro de PSD.

3.- Tolerancia de error igual a 0.00001 cm.

Una vez definidos los elementos necesarios, se llevó a cabo la evaluación de la respuesta del sistema descrito con anterioridad con el programa PSD. Del análisis se obtuvo la historia de desplazamientos presentada en la figura 6.12, la cual es comparada con la obtenida del NONLIN.

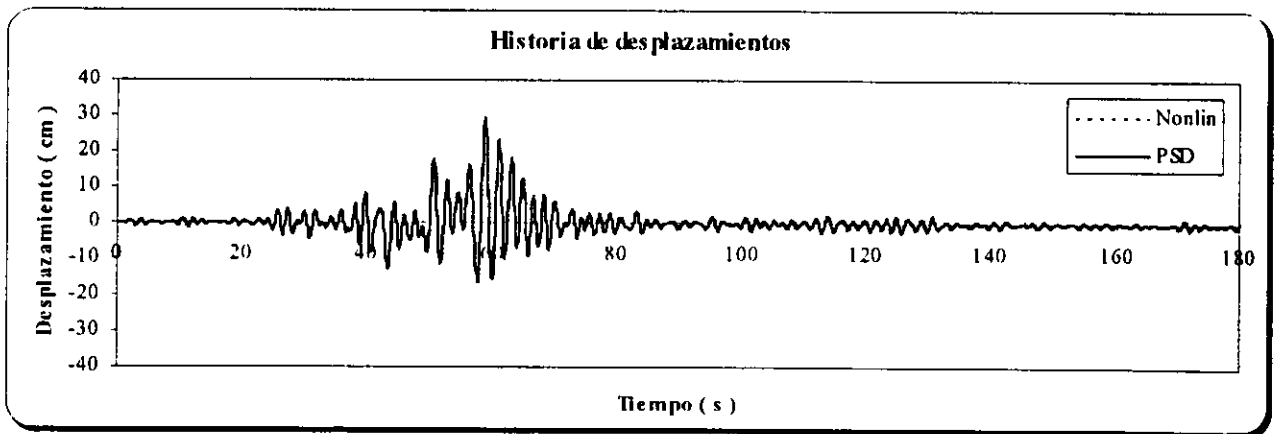


Fig. 6.12.- Respuesta del sistema de IGDL no lineal.

La estructura en estudio desarrolló una ductilidad de 4.089, con un desplazamiento máximo de 29.644 cm y un desplazamiento de fluencia de 7.25 cm.

Al observar la figura que se presenta en la parte superior, la respuesta obtenida con PSD es prácticamente igual a la que se obtuvo del análisis del sistema utilizando el programa NONLIN. Es

importante conocer el comportamiento no lineal del sistema en estudio, por lo que, en la figura 6.13 se muestra la relación desplazamiento-cortante desarrollada por el sistema durante el análisis. De la observación de la misma se puede encontrar una gran similitud entre ambas respuestas.

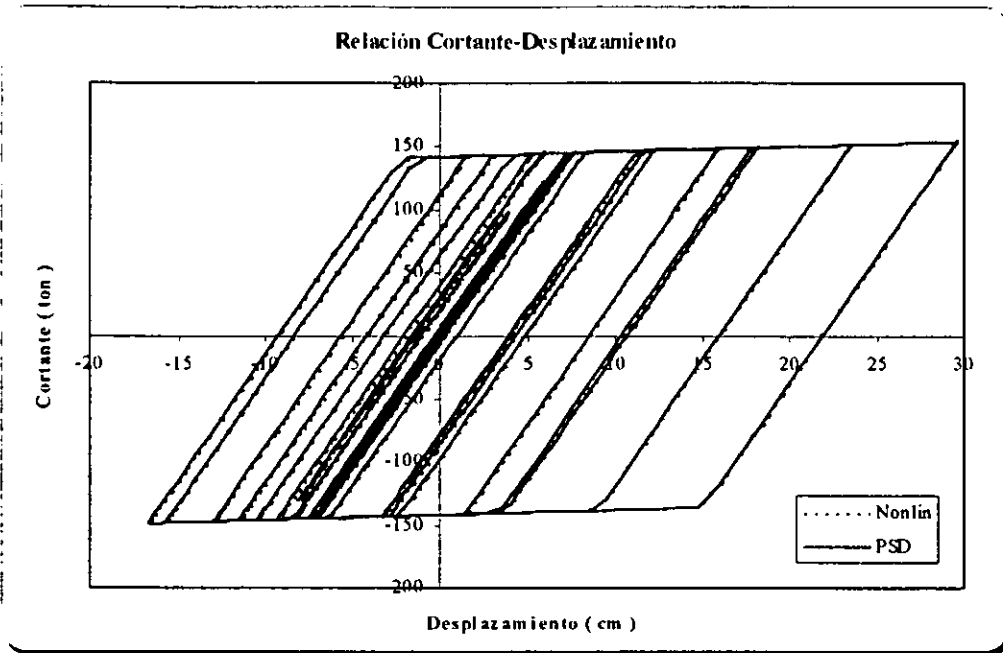


Fig. 6.13.- Relación cortante-desplazamiento del sistema de 1GDL.

Para tener una visualización más clara de la similitud entre ambas respuestas, en la figura 6.14 se presenta un detalle de la variación de la fuerza cortante desarrollada por el sistema; así, se concluye que los algoritmos de PSD funciona de manera adecuada para comportamiento no lineal.

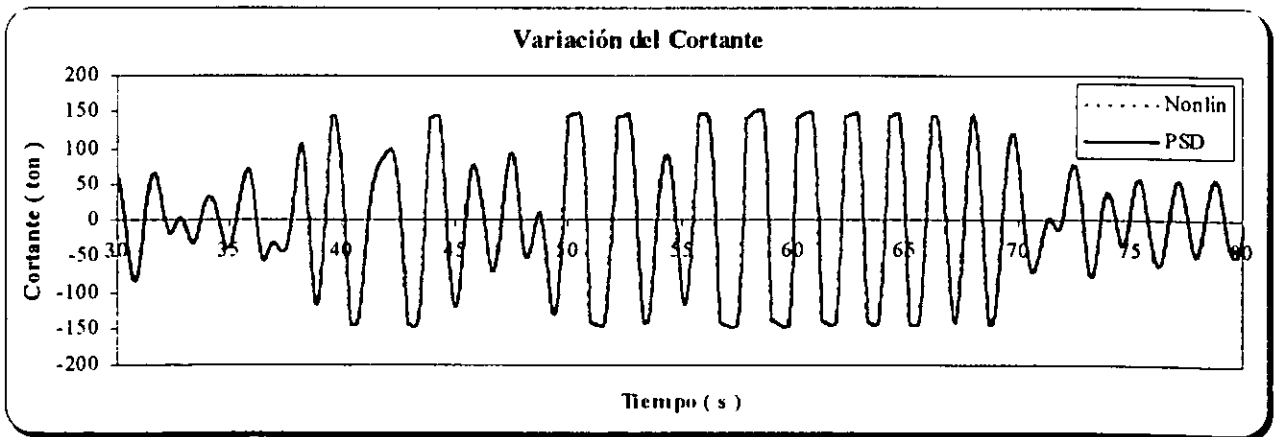


Fig. 6.14.- Detalle de variación del cortante en el tiempo. sistema 1GDL.

## **CONCLUSIONES**

En el presente trabajo se estudiaron los algoritmos de solución de la ecuación de equilibrio dinámico gobernante del movimiento de una estructura sometida a un movimiento sísmico. Se seleccionó el más adecuado, de acuerdo a sus propiedades, para ser utilizado en una prueba pseudodinámica. Se estudió el origen de los errores, listándose algunas recomendaciones encontradas en la bibliografía para tratar de evitarlos. Además, se desarrolló una herramienta práctica, el programa de control, para poder llevar a cabo un experimento pseudodinámico; para validar el mismo, se crearon rutinas numéricas que generan los valores de fuerza a usar en el proceso y se analizaron distintos sistemas; las respuestas fueron comparadas con los resultados obtenidos de programas ampliamente utilizados en el mercado.

Del proceso y resultados obtenidos se puede concluir que:

1.- De acuerdo a los resultados encontrados durante la revisión bibliográfica se puede decir que el método pseudodinámico tiene ventajas sobre los otros métodos experimentales ya que, al evaluar la ecuación de movimiento en cada instante de tiempo, toma en cuenta las características dinámicas de la estructura y del movimiento sin la necesidad de contar con una mesa vibradora, además, elimina las incertidumbres de modelar el comportamiento histerético de los elementos que forman parte del sistema estructural y permite una observación detallada de la evolución del experimento.

2.- De resultados experimentales, observados durante la revisión bibliográfica, en donde se utilizó el Método- $\alpha$ , algoritmo de integración incorporado al programa de control de experimentos pseudodinámicos desarrollado durante el presente trabajo, se concluye que: presenta propiedades superiores frente a otros algoritmos utilizados anteriormente; en él, se lleva a cabo una corrección a la respuesta que permite reducir los errores numéricos que pudieran presentarse durante el experimento.

3.- El control dual de desplazamientos con que cuenta el algoritmo nos permite eliminar los agentes externos que pudieran afectar el experimento, como: deformación del sistema de reacción y colocación incorrecta de actuadores.

4.- Gracias al uso de rigidez inicial en el proceso de corrección, así como al factor de reducción que se aplica a la señal de desplazamientos a aplicar a la estructura, se controla adecuadamente el aspecto más preocupante al realizar un experimento pseudodinámico: el sobre-esforzar al modelo por desplazamientos que van más allá del punto de equilibrio.

5.- Los errores más significativos se pueden presentar en la parte experimental de la prueba. Por tanto, al realizar una prueba pseudodinámica es primordial llevar a cabo una correcta instrumentación del modelo a ensayar, considerando dentro de este concepto todo el proceso de instalación de equipo, incluyendo actuadores, transductores, tarjeta de adquisición de datos, caja de switches, así como calibración de todos los elementos que componen la interface de comunicación entre el proceso experimental y el numérico.

6.- De las simulaciones numéricas elaboradas durante el desarrollo de este trabajo se puede establecer que el algoritmo y todas las rutinas incorporadas al programa de control trabajan de manera adecuada.

7.- Debido a que se incorporaron al programa de control rutinas de procedimientos dinámicos como el cálculo de valores y vectores característicos, evaluación de matriz de amortiguamiento y rutinas de comportamiento lineal y no lineal es posible, con pequeñas modificaciones, utilizarlo en otro tipo de análisis como: evaluación de la respuesta de sistemas de múltiples grados de libertad no lineal, análisis espectral elástico e inelástico, entre otras.

8.- Al ser implementado el procedimiento pseudodinámico con la técnica de la subestructuración, se pueden ensayar experimentalmente subensambles críticos de sistemas muy grandes sin la necesidad de probar toda la estructura.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- 1.- Bazán y Meli. "Diseño sísmico de edificios". Limusa, México, 1998.
- 2.- Buonopane and White. "Seismic evaluation of a masonry infilled reinforced concrete frame by pseudodynamic testing". Technical Report MCEER-99-0001. Ithaca, New York. February 16, 1999.
- 3.- Chopra. "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering". Prentice-Hall, USA, 1995.
- 4.- Hilber, Hughes and Taylor. "Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 5, pp. 283-292, 1977.
- 5.- Hughes, Pister and Taylor. "Implicit-explicit finite elements in nonlinear transient analysis". Computer methods in applied mechanics and engineering 17/18, pp. 159-182, 1979.
- 6.- Mahin and Shing. "Pseudodynamic method for seismic testing". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 7, pp. 1482-1503, July, 1985.
- 7.- Mosalam, White and Ayala. "Response of infilled frames using pseudo-dynamic experimentation". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 589-608, 1998.
- 8.- Nakashima, Kaminosono, Ishida and Ando. "Integration techniques for substructure pseudo dynamic test". Proceedings of Fourth U.S. National Conference en Earthquake Engineering, Vol. 2, Palm Springs, California, May 20-24, 1990.

- 9.- Shing and Mahin. "Pseudodynamic test method for seismic performance evaluation: theory and implementation". Report No. UCB/EERC-84/01. January 1984.
- 10.- Shing and Mahin. "Rate-of-loading effects on pseudodynamic tests". Journal of Structural Engineering, ASCE , 1988.
- 11.- Shing, Kakashima and Bursi. "Application of pseudodynamic test method to structural research". Earthquake Spectra, Vol. 12, No 1, pp.29-56, February 1996.
- 12.- Shing and Vannan. "Implicit time integration for pseudodynamic tests: convergence and energy dissipation". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 809-819, 1991.
- 13.- Shing, Vannan and Carter. "Implicit time integration for pseudodynamic tests". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 551-576, 1991.
- 14.- Takanashi and Nakashima. "Japanese activities on on-line testing". Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 7, pp. 1014-1032, July 1987.



# APÉNDICE A

---

---

## *PSD* *MANUAL DEL USUARIO*

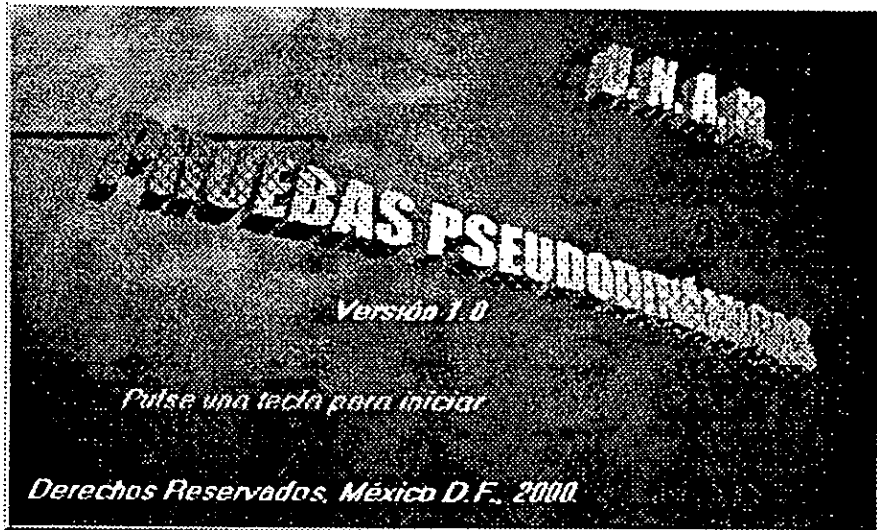
---

---

# PSD

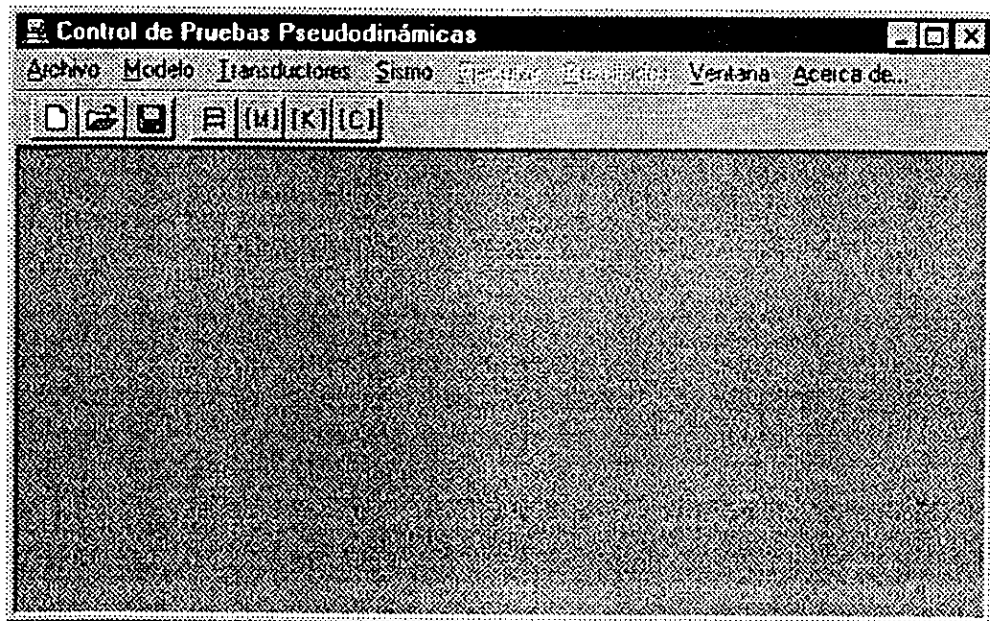
## PROGRAMA DE CONTROL DE PRUEBAS PSEUDODINÁMICAS

### Manual del Usuario



Para ingresar al programa, seleccionar el archivo psd.exe.

Una vez dentro del mismo, aparecerá la pantalla general del programa de control y que cuenta con el menú principal para el desarrollo del experimento:



*Descripción del menú principal:*

Archivo.- Contiene las ordenes para manipulación de archivos de datos.

Modelo.- Características del modelo a ensayar.

Transductores.- Datos de calibración del equipo, en caso de ser necesario.

Sismo.- Selección del registro de aceleraciones a utilizar durante el experimento.

Ejecutar.- Iniciar experimento pseudodinámico.

Resultados.- Visualización gráfica de resultados finales.

Ventana.- Organización de la ventana de trabajo.

Acerca de.- Información de PSD.

El formato general cuenta con una barra de herramientas con la que se tiene acceso directo a algunas de las rutinas más importantes del programa, dicha funciones son descritos con detalle en las siguientes páginas.

A continuación se hace una descripción detallada de cada una de las funciones necesarias para llevar a cabo un experimento pseudodinámico que se encuentran contenidas dentro del programa de control PSD.

### **A.1.- Manejo y manipulación de Archivos**

Las funciones para creación y modificación de archivos se encuentran dentro del menú *Archivo*, contenido en el menú principal. Dentro del mismo podemos encontrar opciones comúnmente utilizadas en ambiente Windows:

*Nuevo* ( Ctrl + N ): Nuevo archivo de datos.

*Abrir* ( Ctrl + A ): Abrir archivo de datos existente.

*Guardar* ( Ctrl + G ): Guardar archivo con el nombre actual.

*Guardar Como* ( Ctrl + C ): Guardar archivo con un nombre distinto.

*Salir* ( Ctrl + S ): Salir de PSD.

## A.2.- Parámetros del experimento y del modelo a ensayar

Dentro del menú Modelo, seleccionar el submenú llamado *Datos Generales de la Prueba*. Aparecerá una ventana como la que se muestra a continuación.

### A.2.1.- Datos Generales de la Prueba

*Nombre:* Nombre de identificación del experimento.

*Delta t ( s ):* Incremento de tiempo a utilizar durante la prueba. Este valor debe de coincidir con el de la señal a utilizar. Los registros preestablecidos tienen un intervalo de digitización de 0.02 s.

*Máxima iteración:* Número máximo de iteraciones a realizar durante el proceso de equilibrio de la ecuación en un instante de tiempo determinado.

*Numeración GDL:* Identifica el orden de numeración de los grados de libertad. 0:De abajo hacia arriba, 1:De arriba hacia abajo.

*Factor de Reducción:* Valor del factor de reducción a aplicar a los desplazamientos que serán enviados a los actuadores para evitar sobredesplazamientos.

*Aceleración de la Gravedad:* Dependerá del valor de las unidades seleccionadas y se establece de manera automática al definir estas últimas.

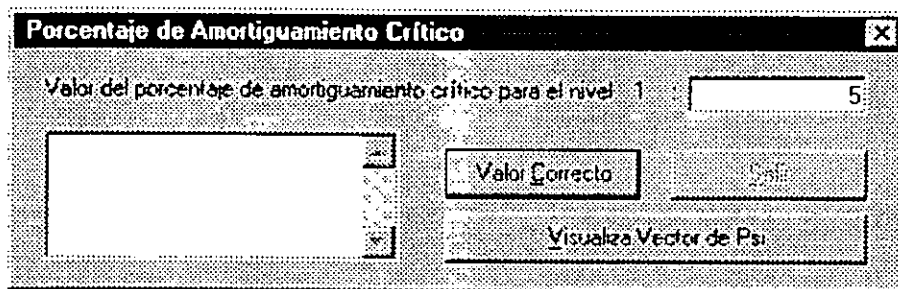
### A.2.2.- Algoritmo de Hilber y Hughes

Este método de integración esta regido por tres parámetros,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , los cuales establecen sus propiedades.  $\beta$  y  $\gamma$  dependen de manera directa de  $\alpha$ , por tanto, solo es necesario establecer el valor de  $\alpha$ , para que  $\beta$  y  $\gamma$  sean calculados automáticamente.

### A.2.3.- Porcentaje de Amortiguamiento Crítico

Visualizar valores existentes.- Presionar el botón *Listar Psi* y los valores serán desplegados en el cuadro de texto que se encuentra en la parte superior del mismo.

Nuevos valores.- Presionar el botón *Nuevos Valores*, aparecerá una ventana en la que se introducen los valores del porcentaje de amortiguamiento crítico. Dicha ventana se muestra a continuación.



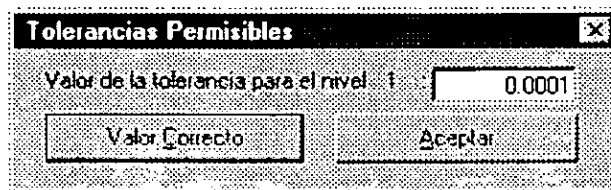
Teclear el valor del amortiguamiento como porcentaje del critico, presionar *Valor Correcto* para aceptar y proceder al siguiente. Una vez que se ha terminado de introducir los valores, pueden ser visualizados en el cuadro de texto que se muestra en la parte inferior izquierda, si algún valor es incorrecto, presionar el mismo botón que se utilizó para aceptar los valores y que ahora mostrará la leyenda *Valores Incorrectos* y proceder de la misma manera.

Para aceptar el vector presionar el botón *Salir*.

#### A.2.4.- Tolerancia de error

Visualizar valores existentes.- Presionar el botón *Editar Tolerancias* y los valores serán desplegados en el cuadro de texto que se encuentra en la parte superior del mismo.

Nuevos valores.- Presionar el botón *Nuevas Tolerancias*, aparecerá una ventana en que se introducen los valores de tolerancia de error a utilizar durante el experimento.



Teclear cada uno de los valores de tolerancia de error, introduciéndolos al presionar el botón *Valor Correcto*. Al finalizar, presionar *Aceptar* para regresar a la ventana anterior.

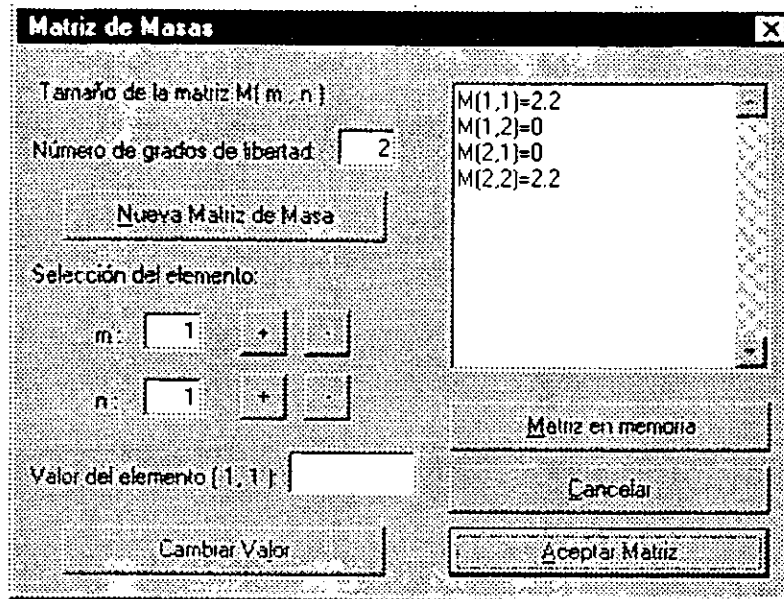
#### A.2.5.- Unidades

Establecer las unidades de fuerza y aceleración en que se trabajará durante el experimento, teniendo compatibilidad con las unidades de las matrices de masa y rigidez. Cabe mencionar que estas unidades pueden diferir de las unidades en que se encuentra la señal a utilizar.

#### A.3.- Propiedades de masa y rigidez del modelo

Para llevar a cabo un experimento pseudodinámico es necesario contar con las matrices de masas y rigidez del sistema ya que serán utilizadas en el proceso numérico, así como para el cálculo de las propiedades de amortiguamiento del sistema. Cabe mencionar que solo acepta como grados de libertad los desplazamientos horizontales de masas concentradas.

Seleccionar *Matrices Iniciales* contenida dentro del menú *Modelo*. Se mostrará una cascada en donde aparece la opción de *Masas* o *Rigidez* que deseemos introducir o visualizar. Al realizar la selección mencionada anteriormente, se visualiza la ventana siguiente:



*Establecer Dimensión.-* Presionar *Nueva Matriz*. Establecer el número de grados de libertad, presionar *Aceptar Tamaño*, que aparecerá al presionar *Nueva Matriz*.

*Introducir los valores de la matriz.-* Teclar el valor del elemento y aceptar. El botón de *Aceptar Valor* estará ubicado en donde aparece el de *Cambiar Valor* en la figura.

*Visualizar Matriz.-* Presionar *Matriz en Memoria*, los elementos de la matriz serán desplegados en el cuadro de texto que se encuentra en la parte superior del mismo.

*Seleccionar elemento.-* Pulsar los botones (+) y (-), el valor del elemento seleccionado se visualizará en el cuadro de texto correspondiente.

*Cambiar Valor.-* Seleccionar el elemento a cambiar, presionar el botón del mismo nombre, teclear el valor y aceptarlo.

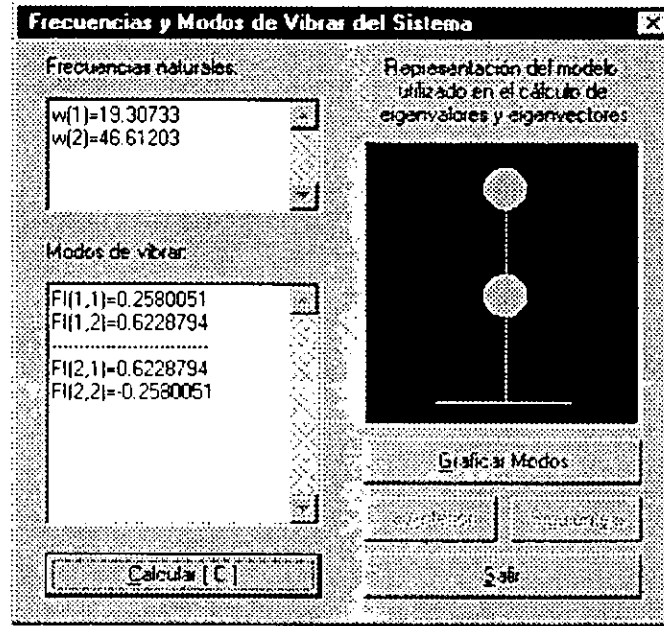
*Cancelar.-* Salir sin realizar cambio alguna a la matriz en memoria.

*Aceptar Matriz.-* Asigna los valores a la memoria.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

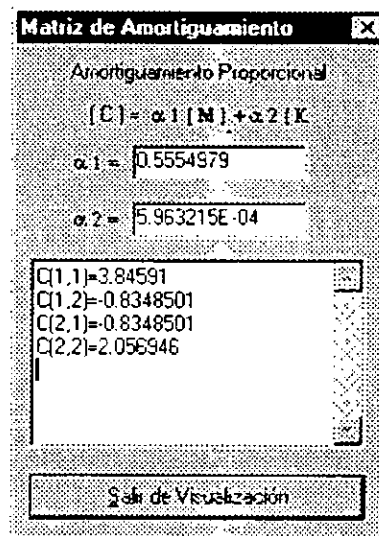
#### A.4.- Formas modales y propiedades amortiguamiento del sistema

En el menú de *Modelo* seleccionar el menú *Amortiguamiento y Valores Característicos* (*Ctrl + V*). Al seleccionarlo se llevará a cabo el cálculo de frecuencias y formas modales así como, de la matriz de amortiguamiento del sistema en estudio, presentándose de la siguiente forma:



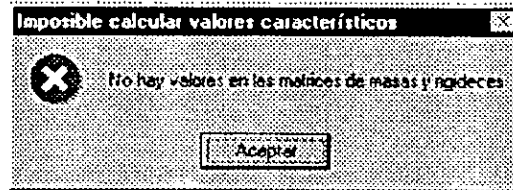
*Graficar Modos.*- Se graficará el primer modo, seleccionar los subsecuentes con los botones *Anterior* y *Siguiente*.

*Calcular C.*- Calcula la matriz de amortiguamiento y la despliega en pantalla.





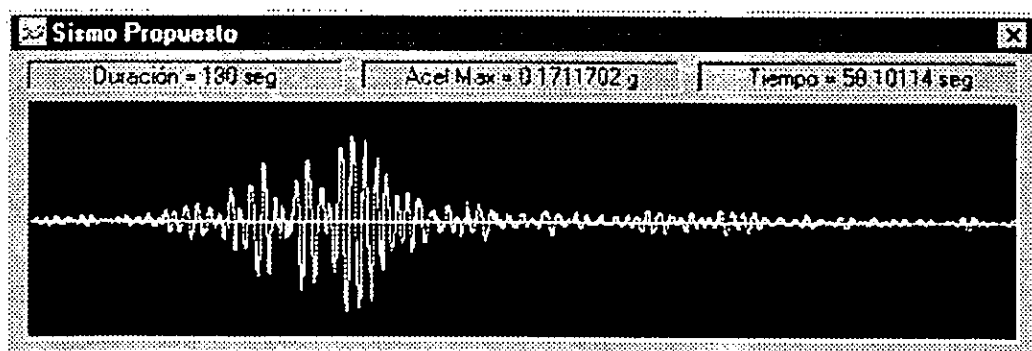
En caso de que alguno de los valores introducidos dentro del programa esté incorrecto, se desplegará un cuadro de dialogo como el que se muestra a continuación. Para corregir, revisar las matrices de masa y rigidez.



### A.5.- Señal a la que estará sometido el sistema

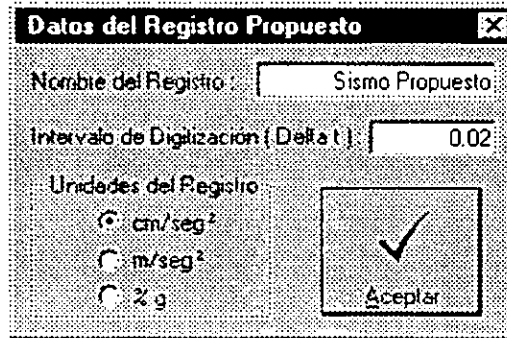
PSD cuenta con algunos registros de sismos que se han presentado principalmente en Estados Unidos, además, cuenta con el conocido acelerograma registrado en la SCT en México D.F., correspondiente al sismo del 19 de septiembre de 1985. Además, existe la opción de seleccionar otro registro distinto de los que se incluyen en él.

Para tener acceso a ellos entrar al menú *Sismo* y seleccionar el registro deseado. La historia de aceleraciones será graficada, mostrándose duración, aceleración máxima e instante en que se presenta.



Cuando es necesario seleccionar un sismo distinto de los que se incluyen en PSD, dentro del mismo menú *Sismo*, seleccionar la opción *Sismo Propuesto*, se desplegará la ventana de *Abrir Archivo* para seleccionar el archivo de datos que contiene al registro. Enseguida aparecerá una

ventana en la que se tienen que definir las características del sismo a utilizar. Dentro de las características se incluyen el nombre del registro, intervalo de digitización de la señal y las unidades en que fue registrado el acelerograma.

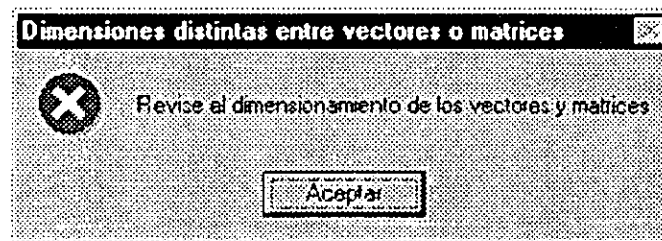


Una vez que se han tecleado los datos correspondientes, presionar Aceptar para ver la gráfica correspondiente.

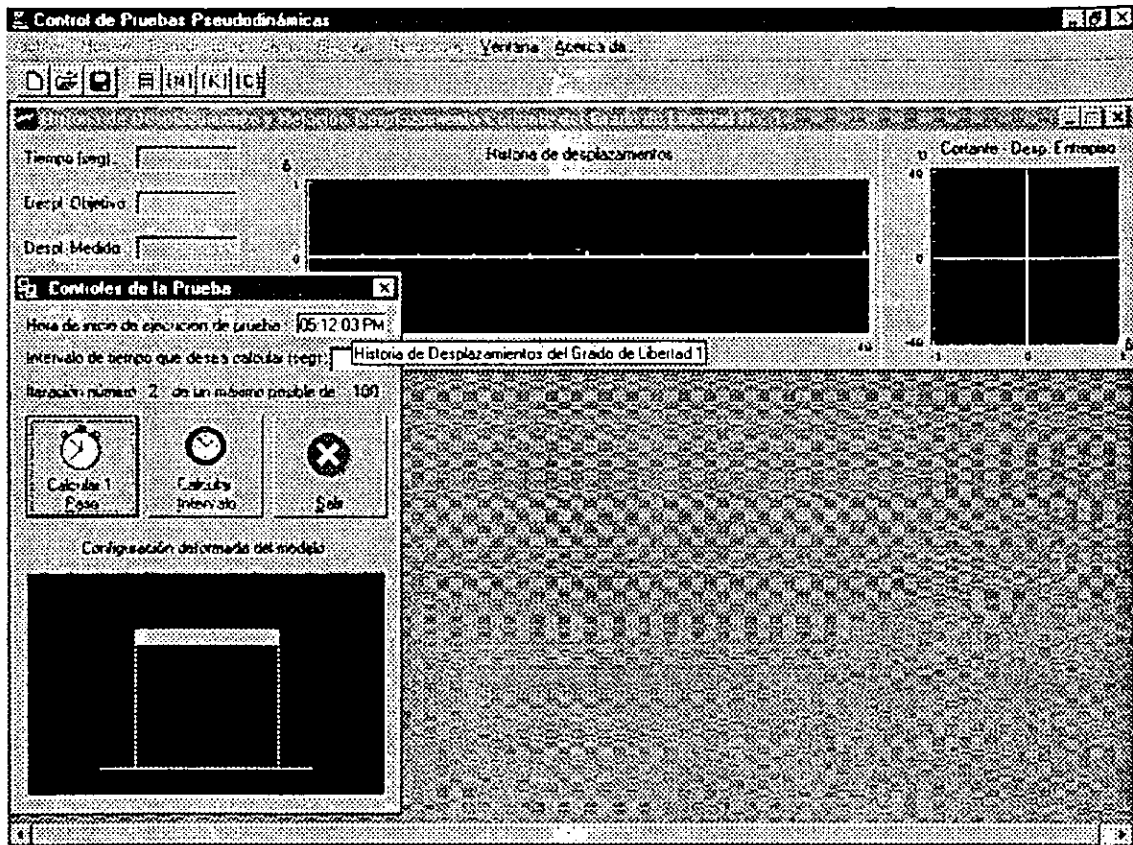
NOTA: Es importante mencionar que el archivo de datos del registro solo debe de contener los datos de aceleración.

#### A.6.- Ejecución del experimento

Para iniciar la ejecución del experimento se debe de seleccionar el menú Ejecutar. Si al pulsar el mismo existe una discrepancia entre el tamaño de los arreglos, matrices y vectores, o se ha omitido alguno de los datos necesarios para dar inicio se desplegará un cuadro de diálogo como el que aparece a continuación.



Si no existe ningún error en el dimensionamiento de las matrices o vectores, se desplegarán en pantalla el formato general de ejecución. Dicho formato cuenta con una ventana denominada Historia de desplazamiento y relación desplazamiento-cortante por cada uno de los grados de libertad existente en el experimento, además, se desplegará la ventana de Controles de la Prueba, como se muestra a continuación.



En los controles de la prueba, además de la hora de inicio del experimento y el número de iteraciones por cada paso de integración, aparecen las siguientes opciones:

*Calcular 1 paso.*- Calcula un paso de integración.

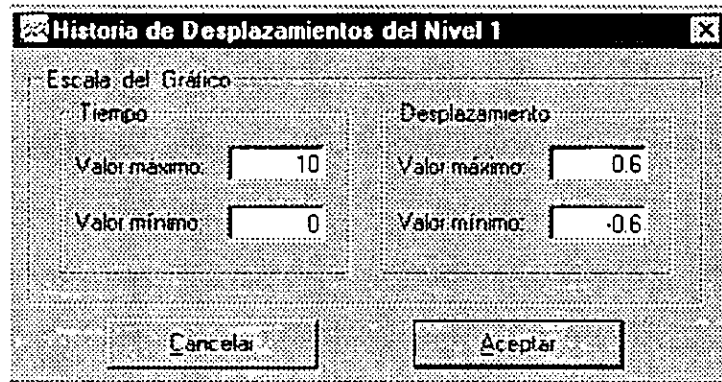
*Calcular Intervalo.*- Teclear el intervalo de tiempo a ser evaluado en el cuadro de texto correspondiente, pulsar el botón de Calcular Intervalo.

*Salir.*- Terminar la ejecución.

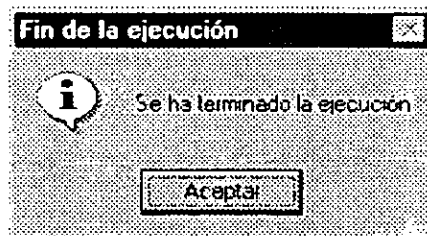
Durante la ejecución se muestra de manera gráfica el desarrollo de la misma mediante la historia de desplazamientos y la relación cortante-desplazamiento de entrepiso, además, algunos valores numéricos de interés en el paso de integración en estudio.



*Cambiar escala de gráficas.*- Colocar el puntero del ratón sobre la gráfica que se desea ser modificada, pulsar el botón derecho del ratón. Se desplegarán los valores de la escala actuales a modificar.

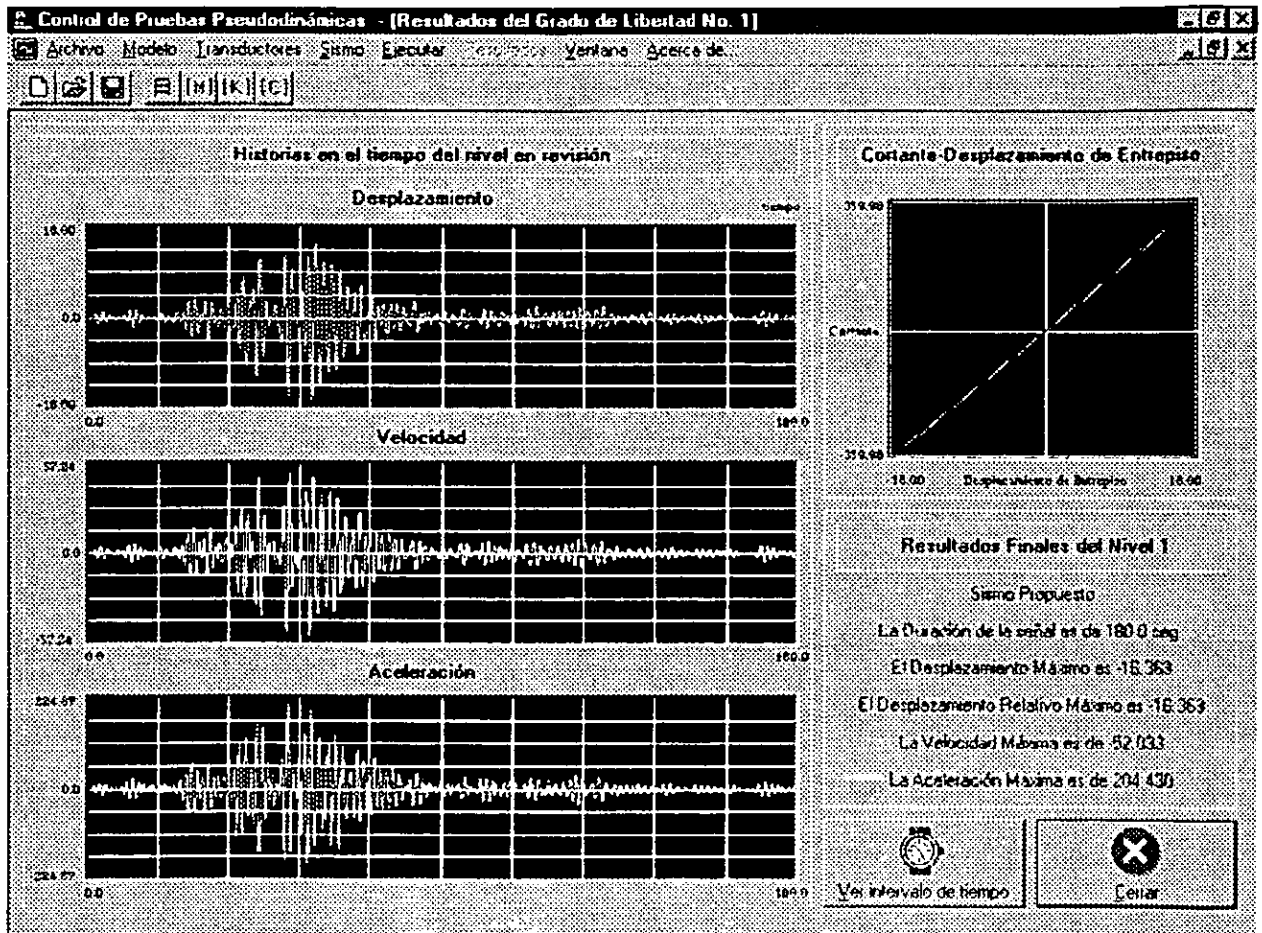


*Finalización de ejecución.*- Al encontrar el último dato del registro de aceleraciones se producirá el término del experimento, desplegando el siguiente cuadro de diálogo.



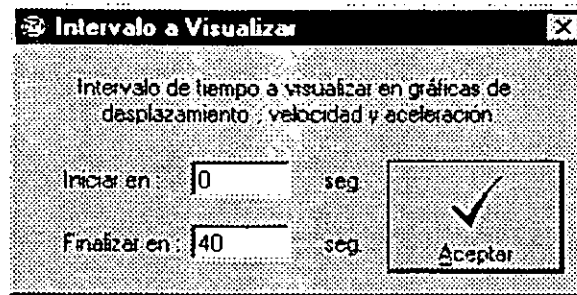
### A.6.- Resultados finales

Una vez finalizado el experimento se puede visualizar los resultados finales del experimento al seleccionar *Resultados* en el menú principal y que se activará en el instante en que se termine la ejecución del experimento. Se visualizarán de la forma que se muestra enseguida.



Dentro de los resultados finales se presenta el tiempo de duración de la evaluación, los resultados máximos de desplazamiento, velocidad y aceleración para cada uno de los niveles.

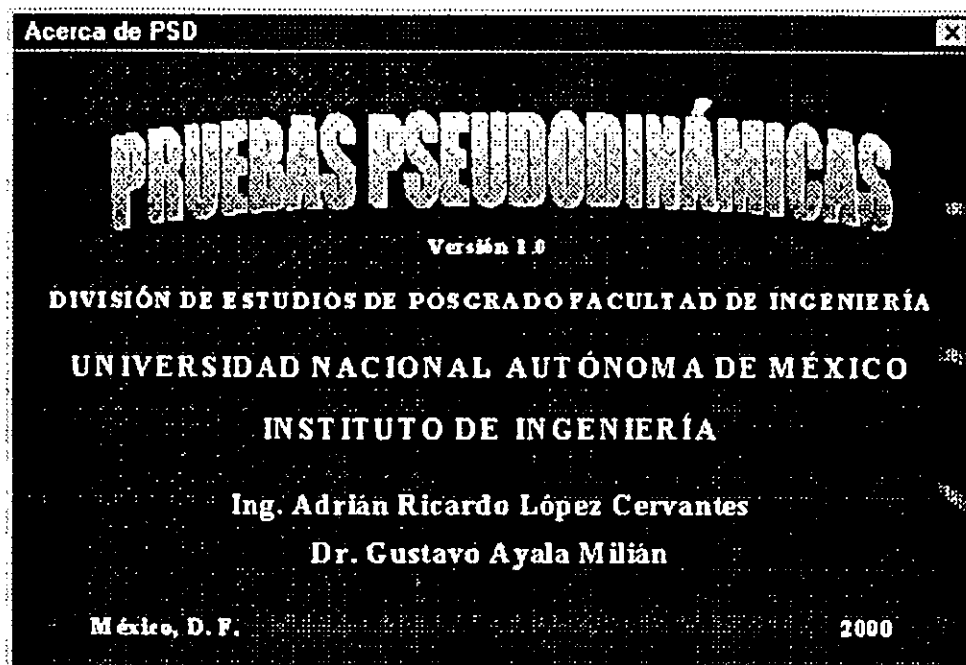
En muchas ocasiones, es deseable ver un detalle del periodo crítico del movimiento por lo que, si se desea ver un detalle de la respuesta presionar el botón *Ver intervalo de tiempo*, se mostrará una ventana para definir el periodo o intervalo de visualización.



Para ver la respuesta de otro de los grados de libertad seleccionar el nivel deseado en el menú *Ventana*, el cual trabaja de manera similar a todos las aplicaciones que trabajan bajo ambiente Windows.

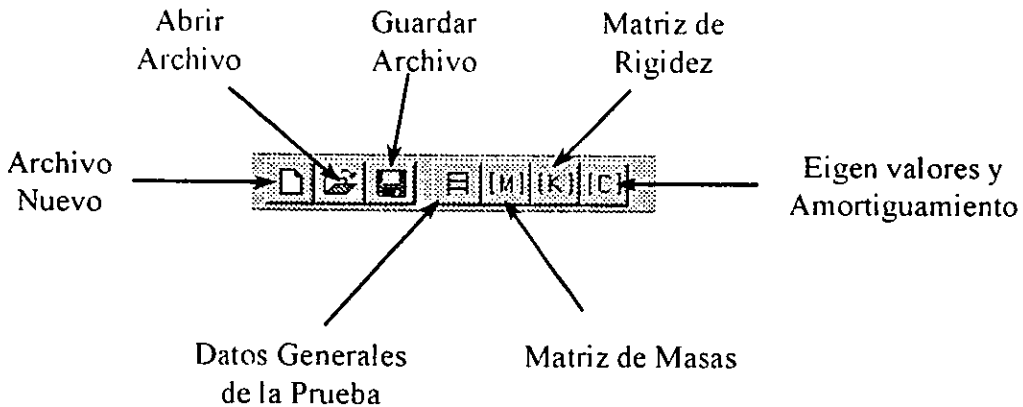
NOTA: Los resultados quedarán grabados en archivos, correspondiendo a un grado de libertad cada uno de ellos. Dentro de ellos se almacena tiempo, desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza restauradora, desplazamiento de entrepiso y cortante. Los archivos tendrán el mismo nombre que el archivo de datos del experimento, con una extensión que indica el nivel en estudio. (Ejemplo mode.pddnivell )

#### A.7.- Acerca de PSD



### A.8.- Barra de herramientas

Se cuenta con una barra de herramientas que nos permite tener acceso directo a algunas de las acciones mencionadas anteriormente.



### A.9.- Generales

Los archivos de datos que genera PSD tienen extensión PDD. Así, por ejemplo, un archivo de datos puede ser localizado como MGD.L.PDD.

Al ejecutar PSD se crearán archivos que contienen los resultados totales del experimento, uno por cada grado de libertad. Quedarán localizados en el mismo directorio en que se encuentra el archivo de datos. Por ejemplo, para el grado de libertad No. 1 se creará un archivo de resultados nombrado como MGD.L.PDDNIVEL 1

Para un funcionamiento adecuado de PSD, crear una carpeta denominada PSD ubicada en el directorio raíz y copiar dentro de ella el archivo ejecutable así como la carpeta que contiene los registros sísmicos preestablecidos.

APÉNDICE B

---

---

*TARJETA DE  
ADQUISICIÓN DE DATOS*

---

---



## **TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

Un dispositivo muy importante durante el desarrollo de una prueba pseudodinámica es la Tarjeta de Adquisición de Datos (NI-DAQ), que permite adquirir y convertir los datos. En este caso, se cuenta con una tarjeta AT-MIO-64E-3.

La tarjeta seleccionada cuenta con utilidades que permiten su uso desde varios lenguajes, uno de ellos es el Visual Basic. Dentro de estas utilidades existen cuatro archivos que pueden ser de utilidad y que se encuentran contenidos con las ayudas, dichos archivos son: NIDAQ32.BAS, NIDAQCNS.INC, NIDAQERR.INC, NIDEX32.BAS. A continuación se da una breve descripción de la función de cada uno.

### **NIDAQ32.BAS**

En él se encuentran los prototipos de las funciones del NI-DAQ para ser utilizados dentro de un proyecto elaborado en Visual Basic.

### **NIDACNS.INC**

Contiene las definiciones para algunas constantes que son requeridas por algunas funciones del NI-DAQ. Dentro de Visual Basic se puede agregar dicho archivo dentro del proyecto, así se podrán usar las constantes en cualquier módulo del programa.

### **NIDAQERR.INC**

Este archivo contiene las funciones de errores y mensajes de alerta que se pueden utilizar en Visual Basic.

### **NIDEX32.BAS**

Algunas ayudas que son utilizadas en los ejemplos de uso de funciones de NI-DAQ. Dichas ayudas pueden ser incluidas en el proyecto al adicionar este archivo como un módulo del mismo. Entre las funciones que pueden ser llamadas al incluir este archivo se encuentran:

*NIDAQDelay.* - Hacer una pausa en el entorno de tareas (segundos).

*NIDAQErrorHandler.* - Despliega una caja de diálogo de error y la descripción del error que se ha producido.

*NIDAQMakeBuffer.* - Crear un buffer arbitrario para uso con funciones NI-DAQ.

*NIDAQMean.* - Calcula media aritmética de los valores de un arreglo de datos.

*NIDAQWaitForKey.* - Pausa hasta que se pulse una tecla o que un intervalo de tiempo límite transcurra.

*NIDAQYield.* - Previene otros eventos.

El incluir estos cuatro archivos es de gran utilidad en el desarrollo de proyectos. Para incluir un archivo en el proyecto, ir al menú *Project*, seleccionar *Add Module*, presionar *Existing*. Seleccionar, por ejemplo, *NIDAQCNS.INC* y presionar *Open* para adicionarlo el archivo en el proyecto.

EL NI-DAQ cuenta con funciones que nos permiten comunicar el programa en desarrollo con la tarjeta misma. Todas las funciones utilizadas por el NI-DAQ tienen la siguiente forma:

status = Function\_Name (parameter 1, parameter 2 ... parameter n)

Las funciones podemos englobarlas, de acuerdo a la tarea que desarrollan, en grandes grupos que se listan a continuación:

### **1.- Funciones de Inicialización y Configuración General.**

*Get\_DAO\_Device\_Info.* - Recupera parámetros que pertenecen a la operación.

*Get\_NI\_DAO\_Version.* - Retorna el número de versión de la librería NI-DAQ.

*Init\_DA\_Brds.* - Inicializa el software y hardware de National Instruments a su estado por default.

*Set\_DAO\_Device\_Info.*- Cambia el modo de transferencia de datos para ciertas clases de operación.

*Timeout\_Config.*- Establece el tiempo límite usado en funciones sincrónicas para asegurar que eventualmente dichas funciones regresen a la aplicación.

## **2.- Funciones de Calibración del Software y Especificación de dispositivo.**

*AO\_Calibrate.*- Carga un conjunto de constantes de calibración

*Calibrate\_E\_Series.*- Calibra los dispositivos de la serie E.

*Configure\_HW\_Analog\_Trigger.*- Configura el disparador analógico.

*MIO\_Calibrate.*- Calibración de algunos dispositivos.

*MIO\_Config.*- Activa o desactiva el dither.

## **3.- Funciones de Mensaje de Eventos.**

*Config\_Alarm\_Deadband.*- Notifica a las aplicaciones cuando se encuentra con una condición de alarma especificada.

*Config\_ATrig\_Event\_Message.*- Notifica a las aplicaciones cuando el disparador de señal del canal encuentra un criterio especificado.

*Config\_DAO\_Event\_Message.*- Notifica a las aplicaciones cuando el estado de la operación asincrónica encuentra un criterio especificado.

## **4.- Funciones de Entrada Analógica.**

a) Entrada analógica de una señal.

*AI\_Check.*- Retorna el estado del sistema analógico y de una entrada analógica si está disponible. Se utiliza cuando la conversión es iniciada con pulsos externos.

*AI\_Clear.*- Limpia la entrada analógica y vacía la memoria, incluso condiciones de error.

*AI\_Configure.*- Información del modo de salida, rango de entrada y polaridad seleccionada para el dispositivo.

*AI\_Mux\_Config.*- Configura el número de multiplexores.

*AI\_Read.*- Lee un canal de entrada analógica (inicia una conversión A/D) y regresa el resultado no escalado.

*AI\_Setup.*- Selecciona un canal analógico de entrada y asigna ganancia para operaciones de conversión externas.

*AI\_Vread.*- Lee un canal de entrada analógico (conversión A/D) y regresa el valor escalado a voltaje con unidades de volts.

*AI\_Vscale.*- Convierte el resultado binario de *AI\_Read* llamado anteriormente, al voltaje actual de entrada.

## b) Adquisición de datos.

### 1.- Alto Nivel

*DAQ\_Op.*- Ejecuta una operación de un simple canal sincrónica. No termina hasta que se ha adquirido todos los datos u ocurra un error.

*DAQ\_to\_Disk.*- Ejecuta una sincrónica operación de datos de canal simple y graba los datos leídos en un archivo de disco.

*SCAN\_Op.*- Ejecuta una operación de scanéo multicanal sincrónica.

### 2.- Bajo Nivel

*DAQ\_Check.*- Chequea si la operación del DAC es completa y regresa el estado y número de muestras adquiridos.

*DAQ\_Clear.*- Cancela la operación actual y reinicializa el sistema DAC.

*DAQ\_Config.*- Almacena información de configuración para operaciones subsecuentes del DAC.

*DAQ\_Monitor.*- Retorna los datos de una adquisición asincrónica en proceso. Lee datos del buffer utilizado en la adquisición.

*DAQ\_Rate.*- Convierte un índice DAC dentro del tiempo base.

*DAQ\_Start.*- Inicia una asincronía, operación de simple canal y almacena éstos en un arreglo.

*DAQ\_StopTrigger\_Config.*- Habilita el modo de predisparador de adquisición de datos e indica el número de datos a adquirir después de aplicar el alto al disparador de pulso.

*DAQ\_VScale.*- Convierte los valores de un arreglo de datos binarios adquiridos y asigna la ganancia para estos datos a entradas de voltaje medidos.

*SCAN\_Demux.*- No usada en Visual Basic.

*SCAN\_Sequence\_Demux.*- Reasigna los datos producidos por una adquisición multi-índice de tal manera que todos los datos de cada canal son almacenados en elementos adyacentes en el buffer.

*SCAN\_Sequence\_Retrieve.*- Regresa la secuencia de scanéo creada por NI-DAQ como resultado de una llamada previa de *SCAN\_Sequence\_Setup*.

*SCAN\_Sequence\_Setup.*- Inicializa scanéo múltiple, selecciona canales, asigna ganancias y asigna diferentes índices a cada canal.

*SCAN\_Setup.*- Inicializa el sistema para scanéo de adquisición de datos.

*SCAN\_Start.*- Inicia una operación de scanéo multicanal, con o sin intervalo de sondeo y los almacena en un arreglo.

### 3.- Bajo Nivel Doble Buffer

*DAQ\_DB\_Config.*- Activa o desactiva la operación del DAC del Doble Buffer.

*DAQ\_DB\_HalfReady.*- Verifica si el siguiente medio buffer esta disponible durante la adquisición de datos.

*DAQ\_DB\_Transfer.*- Transfiere la mitad de los datos del buffer usado por el adquisidor de datos a otro buffer.

## 5.- Funciones de Salida Analógica de Grupo.

### a) Salida Analógica

*AO\_Configure.*- Información del rango de salida y polaridad seleccionada para cada canal de salida e indica actualización del modo de adquisición de datos.

*AO\_Update.*- Actualiza los canales de salida analógica a un nuevo voltaje cuando la última actualización interna es activada por una llamada previa de *AO\_Configure*.

*AO\_VScale.*- Escala un voltaje a un valor binario, cuando se escribe en una salida analógica se produce el voltaje especificado.

*AO\_VWrite.*- Acepta un valor de voltaje, lo escala a valor binario propio y escribe este número a la salida analógica para cambiar la salida de voltaje.

*AO\_Write.*- Escribe un valor binario a uno de los canales de salida, cambiando el voltaje producido en el canal.

#### b) Generación de Ondas

*WFM\_from\_Disk.*- Asigna a un archivo de disco uno o más canales de salida analógico, selecciona el índice y número de veces que los datos son generados e inicia generación.

*WFM\_Op.*- Asigna una onda de buffer a uno o más canales de salida e indica el número de ciclos a generar en el buffer e inicia la generación.

*WFM\_Chan\_Control.*- Frena o restablece temporalmente la generación de ondas para un canal analógico de salida simple.

*WFM\_Check.*- Regresa información concerniente a la operación de generación de onda.

*WFM\_ClockRate.*- Asigna un índice de actualización o demora para un grupo de canales de salida analógica.

*WFM\_DB\_Config.*- Activa y desactiva el modo de doble buffer de la generación de onda.

*WFM\_DB\_HalfReady.*- Verifica si el siguiente medio buffer para uno o más canales esta disponible para nuevos datos durante la generación de onda.

*WFM\_DB\_Transfer.*- Transfiere la mitad de los datos del buffer a otro buffer cuando la generación de onda está en progreso.

*WFM\_Group\_Control.*- Controla la generación de onda para un grupo de canales analógicos de salida.

*WFM\_Group\_Setup.*- Asigna uno o más canales de salida a un grupo de generación de onda.

*WFM\_Load*.- Asigna una onda de buffer a uno o más canales de salida e indica el número de ciclos a generar.

*WFM\_Scale*.- Escala un arreglo de números de punto flotante que representan voltaje en un arreglo de números binarios que producen estos voltajes cuando NI-DAQ escribe estos valores a uno de los DACs.

## 6.- Funciones de Entrada/Salida Digital de Grupo.

*DIG\_In\_Line*.- Regresa el estado lógico digital de una línea digital especificada en el puerto asignado.

*DIG\_In\_Port*.- Regresa el dato digital de entrada del puerto de Entrada/Salida especificado.

*DIG\_Line\_Config*.- Configura la dirección (Entrada/Salida) para una línea específica en un puerto.

*DIG\_Out\_Line*.- Asigna o borra la línea digital especificada en el puerto.

*DIG\_Out\_Port*.- Escribe datos digitales de salida en el puerto digital digital especificado.

*DIG\_Prt\_Config*.- Configura la dirección del puerto especificado (E/S)

## 7.- Funciones de Contador/Cronometrador de Grupo.

*CTR\_Config*.- Especifica la configuración del conteo a realizarse en el contador.

*CTR\_EvCount*.- Configura el contador para operación de conteo de un evento y lo inicia.

*CTR\_EvRead*.- Lee el contador sin interrupción o afectación en el proceso de conteo.

*CTR\_FOUT\_Config*.- Activa y desactiva, asigna la frecuencia de salida.

*CTR\_Period*.- Configura el contador especificado para un periodo o medición de un ancho de pulso.

*CTR\_Pulse*.- Origina una demora de pulso o ancho de pulso en el contador especificado.

*CTR\_Rate*.- Convierte la frecuencia y el ciclo necesarios para producir una onda cuadrada por *CTR\_Square*.

*CTR\_Reset.*- Apaga el contador especificado y coloca el driver de la salida del contador en un estado de salida seleccionado.

*CTR\_Restart.*- Restablece la operación del contador especificado.

*CTR\_Simul\_Op.*- Configura, inicia y detiene simultáneamente múltiples contadores.

*CTR\_Square.*- El contador especificado genera una frecuencia cuadrada continua de frecuencia y ciclo especificado.

*CTR\_State.*- Retorna el nivel de salida lógica del contador especificada.

*CTR\_Stop.*- Suspende la operación del contador de forma que pueda ser restablecida su operación.

## 8.- Funciones de RTSI

*RTSI\_Clear.*- Desconecta todas las vías RTSI de señales con el dispositivo.

*RTSI\_Clock.*- Conecta o desconecta el sistema de reloj del RTSI.

*RTSI\_Comm.*- Conecta un dispositivo a la línea de RTSI especificada.

*RTSI\_DisComm.*- Desconecta un dispositivo a la línea de RTSI especificada.

Cuando se pasan arreglos en las funciones NI-DAQ, tiene que ser pasado el primer elemento del arreglo por referencia, por ejemplo:

```
status% = DAQ_Start (device%, chan%, gain%, buffer%(0), count&, timebase%, sampInterval%)
```