



# Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

División de Estudios de Postgrado

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS  
MÉTODOS DE SUPERPOSICIÓN  
MODAL Y GENERALIZADO  
DE NEWMARK

## Trabajo de Investigación

Que para obtener el Grado de:

Maestro en Ingeniería  
( Estructuras )

Presenta:

Gerardo de Jesús López Arciga

Puebla, Pue.

Noviembre de 1990



**UPAEP – Secretaría General**

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

**Tesis Digitales Restricciones de uso:**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

El uso de textos, imágenes, gráficas, 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 de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**UPAEP**  
BIBLIOTECA CENTRAL  
REFERENCIA  
USO UNICAMENTE EN SALA



**ANALISIS COMPARATIVO DE LOS METODOS DE SUPERPOSICION**

**MODAL Y GENERALIZADO DE NEWMARK**

46629

Puebla, Pue. 26 de Octubre de 1990

USO UNICO

Ing. Juan Manuel Espinosa Aranda  
Director General CIRES A. C.  
Presente

Por medio de la presente agradezco las facilidades otorgadas por el "Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C.", para recibir información respecto a temblores ocurridos en la Ciudad de México mediante la donación de algunos acelerogramas captados con la red del Centro y que sirvieron de base para la elaboración de este trabajo.

Sin otro particular quedo de Ud. Su Atto. y S. S.

A T E N T A M E N T E

Gerardo de Jesús López Arciga

ΕΡΟΣ Ψ ΔΙΘΕΒ

Agradezco la ayuda desinteresada del M. I. J. Manuel Cuatlá-yotl y del M. I. Jaime Juárez Botello durante mis estudios de Postgrado.

Agradezco también al M. I. Fernando Vera Badillo todas las enseñanzas que como profesor y amigo me ha brindado, así como el haber sido mi asesor en la elaboración de este trabajo.

## INDICE

INTRODUCCION.....	1
1. METODOS DE ANALISIS SISMICO.....	5
1.1 ANALISIS ESTATICO.....	5
1.2 ECUACION DE MOVIMIENTO.....	7
1.3 ANALISIS DINAMICO.....	10
2. METODO DE SUPERPOSICION MODAL.....	13
2.1 METODO DE SUPERPOSICION MODAL.....	13
2.2 ALGORITMO NUMERICO.....	18
3. METODO DE LA ACELERACION GENERALIZADA DE NEWMARK.....	20
3.1 METODO GENERALIZADÒ.....	21
3.2 ALGORITMO NUMERICO.....	23
4. PROGRAMA DE COMPUTADORA.....	25
4.1 EQUIPO DE COMPUTO.....	25
4.2 ORGANIZACION DEL PROGRAMA.....	26
4.3 MANUAL DEL USUSARIO.....	33
4.3.1 DATOS DE LA ESTRUCTURA.....	33
4.3.2 DATOS DEL ACELEROGRAMA.....	36
4.3.3 PROCESO DE LA INFORMACION.....	43
4.4 LISTADO DEL PROGRAMA.....	45
5. EJEMPLO.....	84
5.1 EJEMPLO 1.....	84
5.2 EJEMPLO 2.....	85
5.3 EJEMPLO 3.....	86

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
6.1 CONCLUSIONES.....	87
6.2 RECOMENDACIONES.....	88
APENDICES.....	90
APENDICE A.....	91
APENDICE B.....	95
B.1 METODOS DE TRANSFORMACION.....	98
B.2 NORMALIZACION.....	101
B.3 METODO DE JACOBI.....	102
APENDICE C.....	106
BIBLIOGRAFIA.....	109
TABLAS.....	110
FIGURAS.....	124

## INTRODUCCION

En la actualidad, una de las herramientas mas poderosas con las que cuenta el ingeniero es la computadora.

Este tipo de herramienta minimiza el tiempo de ejecución de procesos ingenieriles que de otra manera implicarían un trabajo de muchas horas-hombre.

Si se considera ahora el aspecto de Ingeniería Sísmica, se sabe que en la actualidad el estudio de los temblores se restringe al análisis de estructuras por los Métodos Estático y Dinámico que se basan en suponer las aceleraciones de las masas como lineales (estático) o al estudio de pseudoespectros de aceleraciones para conocer los parámetros que se manejan en el análisis dinámico.

Por otro lado, en la parte referente al diseño por sismo

del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal se presenta como opción de los métodos de análisis dinámico el cálculo paso a paso de respuestas a temblores específicos en los cuales se pueden considerar acelerogramas de temblores reales o de movimientos simulados.

El Primer Objetivo de este trabajo es presentar un programa de cómputo para analizar el comportamiento cinemático de estructuras sujetas a sismos conociendo la historia de los movimientos del terreno (acelerogramas) y resolver para cada uno de los puntos del acelerograma la ecuación de movimiento de la estructura, para hallar los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la misma, mediante los Métodos de Superposición Modal y Generalizado de Newmark, comparando los tiempos de operación de cada uno de los métodos, así como la cantidad de bytes que se requiere para almacenar el conjunto de datos que se procesa.

El Segundo Objetivo es proponer el programa mencionado anteriormente para que sirva como alternativa de solución cuando se hace uso de una computadora personal ya que en la actualidad los programas que se presentan para resolver este problema hacen uso de grandes equipos de cómputo.

En el capítulo 1 se presenta un breve resumen de los métodos estático y dinámico para el análisis sísmico.

En el capítulo 2 se desarrolla el Método de Superposición Modal, que es una de las formas que existen en la actualidad para resolver las ecuaciones de equilibrio dinámico.

A manera de comparación con el método anterior se presenta en el capítulo 3 el Método Generalizado de Newmark, en el cual no se desacopla el sistema de ecuaciones diferenciales como se hace en el Método de Superposición Modal, sino que se resuelve de manera inmediata el sistema de ecuaciones que se forma.

En el capítulo 4 se presenta el listado del programa, explicando la forma en que se organizó. En este capítulo se proporciona también el Manual del Usuario para que éste conozca la manera en que se introducen los datos.

En el capítulo 5 se presentan tres ejemplos de aplicación utilizando los dos métodos anteriormente mencionados.

Para finalizar en el capítulo 6 se presentan las Conclusiones y Recomendaciones de este trabajo.

A manera de ayuda para el lector se presentan 3 apéndices al final del trabajo.

El primer apéndice trata el problema de las Vibraciones Libres de Sistemas de Varios Grados de Libertad.

En el segundo apéndice se plantea el problema de los Valores y Vectores Característicos. También se establecen las formas en que este problema se puede resolver, y se presenta el Método de Jacobi.

En el apéndice C se presenta el Método  $\beta$  de Newmark para la solución de la ecuación de equilibrio dinámico de un solo grado de libertad, el cual es base para el Método Generalizado de Newmark.

## **1- METODOS DE ANALISIS SISMICO**

Los métodos que actualmente se utilizan para cuantificar el efecto de los temblores sobre edificios se agrupan en:

**ANALISIS ESTATICO**

**ANALISIS DINAMICO**

La descripción esquemática de los dos métodos se hace a continuación.

### **1.1 ANALISIS ESTATICO**

Las fuerzas sísmicas cuantificadas por este método implican una distribución lineal de aceleraciones en el edificio, como se muestra en la fig. 1.1. De tal figura y mediante la expresión de la Segunda Ley de Newton, para partículas, se

obtienen las expresiones siguientes para las fuerzas ( $F_i$ ):

$$F_i = M_i \ddot{x}_i = \frac{W_i}{g} \ddot{x}_i = W_i h_i \frac{\ddot{x}_N}{g h_N} \quad (1.1)$$

Donde:  $F_i$  es la fuerza aplicada en el nivel  $i$

$M_i$  es la masa del nivel  $i$

$\ddot{x}_i$  es la aceleración del nivel  $i$

$W_i$  es el peso del nivel  $i$

$g$  es la aceleración de la gravedad

$h_i$  es la altura del nivel  $i$  desde la base

Con base en la definición de fuerza cortante basal,  $V_1$ , la definición de coeficiente sísmico,  $c$ , y la ecuación 1.1, se obtiene la expresión siguiente:

$$V_1 = \sum_{j=1}^N F_j = \frac{\ddot{x}_N}{g h_N} \sum_{j=1}^N W_j h_j = c \sum_{j=1}^N W_j \quad (1.2)$$

De la ecuación 1.2 se obtiene la expresión para  $\ddot{x}_N$ , que al sustituirse en la ecuación 1.1 se obtiene la siguiente expresión conocida de  $F_i$ :

$$F_i = c \frac{\sum_{j=1}^N W_j h_j}{\sum_{j=1}^N W_j h_j} W_i h_i \quad (1.3)$$

El coeficiente sísmico generalmente se especifica en función del tipo de estructura y de la zona de desplante de la misma. El reglamento de Construcciones para el Distrito Federal proporciona valores de los coeficientes sísmicos en el D. F. y considera reducciones de las fuerzas calculadas con la ecuación 1.3 cuando se conoce el período fundamental de vibración de la estructura.

## 1.2 ECUACION DE MOVIMIENTO

El caso mas sencillo para estudiar el comportamiento de una estructura ante un movimiento sísmico es considerar un sistema de masa rígida unida al terreno por medio de un resorte y un amortiguador lineales como se muestra en la figura 1.2. Este tipo de modelación se dice que tiene un solo grado de libertad. Ahora bien, para entender mejor el comportamiento de una estructura ante un sismo no podemos estudiarla suponiendo un modelo de un solo grado de libertad, ya que las variaciones de los desplazamientos dependen de la carga dinámica, de la respuesta de la estructura a través del tiempo y además para especificar la configuración deformada de la misma se necesita un número infinito de grados de libertad si suponemos que la estructura está formada de un número infinito de partículas de masa no despreciable (modelo continuo). Sin embargo algunas estructuras se pueden estudiar en forma adecuada mediante un modelo discreto con un número finito de grados de libertad.

A continuación se plantean las ecuaciones de un sistema de varios grados de libertad como el que se muestra en la figura 1.3.

El sistema es lineal y las fuerzas que se desarrollan en el sistema son:

a) Fuerzas Restauradoras Lineales,  $F_R$ , que dependen de los desplazamientos de los puntos del modelo y se expresan como:

$$F_R = K u \quad (1.4)$$

donde  $u$  es el vector de desplazamientos de los puntos de la estructura y  $K$  es la matriz de rigideces de la estructura.

b) Fuerzas Disipadoras Viscosas Lineales,  $F_D$ , que son función de las velocidades de los puntos de la estructura y se representan por:

$$F_D = C \dot{u} \quad (1.5)$$

donde  $\dot{u}$  es el vector de velocidades y  $C$  es la matriz de amortiguamientos del sistema.

Las ecuaciones de movimiento para un sistema de varios grados de libertad, se obtienen a partir de la Segunda Ley de Newton, indicada por:

$$\sum E = M \ddot{u} \quad (1.6)$$

o

$$\sum E = F_E - F_R - F_D = F_E - K u - C \dot{u} \quad (1.7)$$

donde  $\ddot{u}$  es el vector de aceleraciones del sistema,  $F_E$  es el vector de fuerzas externas y  $M$  es la matriz de masas.

Al sustituir las ecuaciones 1.4 a 1.6 en 1.7 resulta:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = F_E \quad (1.8)$$

Para el caso de una estructura sometida a fuerzas sísmicas, debido a que el temblor está asociado a fuertes movimientos del terreno donde se desplantá la estructura, la forma de modelar el movimiento de la estructura se representa en la figura 1.4.

De acuerdo con las ecuaciones 1.4 a 1.6 los elementos de la ecuación de movimiento del sistema mostrado en la figura 1.4 resultan:

$$F_I = M \ddot{u} = M (\ddot{u} + \ddot{u}_g) \quad (1.9)$$

$$F_D = C \dot{u} = C \dot{u} \quad (1.10)$$

$$F_R = K u = K u \quad (1.11)$$

$$F = 0 \quad (1.12)$$

donde  $\ddot{u}_g$  representa la aceleración del terreno donde se desplanta el sistema, medida respecto a una referencia fija.

Al sustituir las ecuaciones 1.9 a 1.12 en la ecuación de movimiento se obtiene:

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + K U = - M \ddot{u}_g \quad (1.13)$$

La expresión representa un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias en la variable tiempo, de segundo orden, lineales, no homogéneas, de coeficientes constantes y acopladas.

El problema de valores iniciales consiste en encontrar una función  $U(t)$  que satisfaga la ecuación 1.13 para lo cual  $t \in [0, t_{\max}]$ ,  $t_{\max} > 0$  con las condiciones iniciales:

$$U |_{t=0} = d \quad (1.14)$$

$$\dot{U} |_{t=0} = v \quad (1.15)$$

### 1.3 ANALISIS DINAMICO

Como ya se vio anteriormente las ecuaciones de equilibrio dinámico de una estructura de comportamiento lineal se pueden escribir como:

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \dot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = \underline{F} \quad (1.16)$$

Para resolver el modelo matemático de la ecuación 1.16 debemos entender que la función  $\underline{F}$  resulta tener una variación similar a los acelerogramas registrados en la base. Los métodos recomendables para integrar las ecuaciones 1.16 son los numéricos, paso a paso. Los métodos numéricos más utilizados son el de Superposición Modal y el grupo de los directos que son el de Beta de Newmark y Theta de Wilson entre otros.

Los métodos paso a paso convendrá utilizarlos cuando las ecuaciones de equilibrio de la estructura proporcionen directamente la información necesaria para cuantificar los elementos de diseño de la estructura (elementos mecánicos y cinemáticos).

El RCDF acepta como métodos de análisis dinámico el análisis modal y el cálculo paso a paso de respuestas a temblores específicos.

Si se usa el análisis modal, deberá incluirse el efecto de todos los modos naturales de vibración con período mayor o igual a 0.4 seg, pero en ningún caso podrán considerarse menos que los tres primeros modos de traslación en cada dirección de análisis.

Si se emplea el método de cálculo paso a paso de respuestas a temblores específicos, podrá acudirse a acelerogramas de temblores reales o de movimientos simulados,

o a combinación de éstos, siempre que se usen no menos de cuatro movimientos representativos, independientes entre sí.

## 2.- METODO DE LA SUPERPOSICION MODAL

### 2.1 METODO DE LA SUPERPOSICION MODAL

En el capítulo anterior se estableció que la ecuación de movimiento para una estructura con varios grados de libertad es:

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \dot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = - \underline{M} \ddot{\underline{u}}_g \quad (2.1)$$

la cual representa un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas.

El Método de Superposición Modal consiste, precisamente, en desacoplar el sistema de ecuaciones diferenciales en  $n$  ecuaciones de un solo grado de libertad.

El desplazamiento para cualquier componente modal se

puede expresar como:

$$\underline{u}_i = r_i y_i \quad (2.2)$$

donde  $y_i$  representa las amplitudes modales.

Para hallar el desplazamiento total se debe efectuar una superposición modal, que equivale a sumar todas las componentes modales, es decir:

$$\underline{u} = \sum_{i=1}^n \underline{u}_i = \sum_{i=1}^n r_i y_i \quad (2.3)$$

lo que se expresa en forma matricial como:

$$\underline{U} = \underline{R} \underline{Y} \quad (2.4)$$

donde  $\underline{R}$  es la matriz modal que tiene como columnas a las formas modales y sirve para transformar las coordenadas generalizadas o naturales  $\underline{Y}$  a las coordenadas geométricas  $\underline{U}$  del sistema.

Al derivar las ecuaciones 2.4 sucesivamente y al considerar que  $\underline{R}$  es independiente del tiempo se tiene:

$$\dot{\underline{U}} = \underline{R} \dot{\underline{Y}} \quad (2.5)$$

$$\ddot{\underline{U}} = \underline{R} \ddot{\underline{Y}} \quad (2.6)$$

Al sustituir 2.4 a 2.6 en la ecuación de movimiento se obtiene:

$$\underline{M} \underline{R} \ddot{\underline{Y}} + \underline{C} \underline{R} \dot{\underline{Y}} + \underline{K} \underline{R} \underline{Y} = \underline{F}_e \quad (2.7)$$

Al premultiplicar 2.7 por  $\underline{R}^T$  se tiene:

$$\underline{R}^T \underline{M} \underline{R} \ddot{\underline{Y}} + \underline{R}^T \underline{C} \underline{R} \dot{\underline{Y}} + \underline{R}^T \underline{K} \underline{R} \underline{Y} = \underline{R}^T \underline{F}_e \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 se puede escribir como:

$$\underline{M}^* \ddot{\underline{Y}} + \underline{C}^* \dot{\underline{Y}} + \underline{K}^* \underline{Y} = \underline{F}^* \quad (2.9)$$

$$\underline{M}^* = \underline{R}^T \underline{M} \underline{R} \quad (2.10)$$

$$\underline{C}^* = \underline{R}^T \underline{C} \underline{R} \quad (2.11)$$

$$\underline{K}^* = \underline{R}^T \underline{K} \underline{R} \quad (2.12)$$

$$\underline{F}^* = \underline{R}^T \underline{F}_e \quad (2.13)$$

Donde  $\underline{M}^*$  y  $\underline{K}^*$  son matrices diagonales. Ahora bien, debido a que en general no se cuenta con información suficiente para definir en forma rigurosa la matriz de amortiguamientos, se suele utilizar el criterio de Rayleigh para definirla, como una combinación lineal de  $\underline{M}$  y  $\underline{K}$  de la

forma:

$$\underline{C} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K} \quad (2.14)$$

donde los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  se obtienen en términos de la primera frecuencia natural de vibración. Entonces, de acuerdo a las ecuaciones 2.10 y 2.12 la matriz  $\underline{C}^*$  de la ecuación 2.11 es una matriz diagonal.

De acuerdo con lo anterior, el sistema 2.9 representa a las ecuaciones de equilibrio dinámico en un espacio definido por la transformación 2.4, denominado espacio natural y corresponde a un sistema de ecuaciones ordinarias de coeficientes constantes no homogéneas y desacopladas.

Lo anterior implica que las ecuaciones 2.9 pueden integrarse por separado y en forma explícita se expresan como:

$$m_1^* \ddot{y}_1 + c_1^* \dot{y}_1 + k_1^* y_1 = f_{E1}^*$$

$$m_2^* \ddot{y}_2 + c_2^* \dot{y}_2 + k_2^* y_2 = f_{E2}^*$$

.....

(2.15)

.....

$$m_n^* \ddot{y}_n + c_n^* \dot{y}_n + k_n^* y_n = f_{En}^*$$

Como puede observarse en 2.15 cada una de las ecuaciones desacopladas es análoga a la ecuación de equilibrio dinámico para un sistema de un grado de libertad. Por esta causa se dice que un sistema de varios grados de libertad queda representado en la referencia natural como un conjunto de n ecuaciones de un grado de libertad.

En caso de normalizar las formas modales con respecto a la matriz de masas la ecuación 2.9 se transforma en:

$$\ddot{y}_1 + (\alpha + \mu p_1) \dot{y}_1 + p_1^2 y_1 = f_{E1}^*$$

$$\ddot{y}_2 + (\alpha + \mu p_2) \dot{y}_2 + p_2^2 y_2 = f_{E2}^*$$

..... (2.16)

.....

$$\ddot{y}_n + (\alpha + \mu p_n) \dot{y}_n + p_n^2 y_n = f_{En}^*$$

donde  $p_1$  representa la frecuencia fundamental de la estructura.

En el método de superposición modal debe resolverse cada una de las ecuaciones 2.16 y con los valores de  $y$ ,  $\dot{y}$  e  $\ddot{y}$  se deben calcular  $u$ ,  $\dot{u}$  y  $\ddot{u}$  de acuerdo a las ecuaciones 2.4 a

2.6.

## 2.2 ALGORITMO NUMERICO

A continuación se describen los pasos a seguir para resolver las ecuaciones de movimiento de un sistema de varios grados de libertad con el Método de Superposición Modal.

- 1.- Leer las matrices  $\underline{M}$  y  $\underline{K}$  y el valor de  $\zeta$ .
- 2.- Obtener la matriz de formas modales,  $\underline{R}$ , normalizada con respecto a  $\underline{M}$ .
- 3.- Calcular los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  a partir de las ecuaciones siguientes:

$$\alpha = \zeta_1 p_1$$

$$\beta = \zeta_1 / p_1$$

- 4.- Leer las condiciones iniciales y la función de carga.
- 5.- Transformar las condiciones iniciales  $\underline{u}_0$ ,  $\underline{v}_0$  y  $\underline{a}_0$  al sistema de referencia natural al resolver los sistemas siguientes.

$$\underline{Y}_0 = \underline{R}^{-1} \underline{U}_0$$

$$\dot{\underline{Y}}_0 = \underline{R}^{-1} \dot{\underline{U}}_0$$

$$\ddot{\underline{Y}}_0 = \underline{R}^{-1} \ddot{\underline{U}}_0$$

6.- Resolver las ecuaciones 2.16 paso a paso y obtener los vectores  $\underline{Y}$ ,  $\dot{\underline{Y}}$  y  $\ddot{\underline{Y}}$  indicados como:

$$\underline{Y} = [ Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n ]^T$$

$$\dot{\underline{Y}} = [ \dot{Y}_1, \dot{Y}_2, \dot{Y}_3, \dots, \dot{Y}_n ]^T$$

$$\ddot{\underline{Y}} = [ \ddot{Y}_1, \ddot{Y}_2, \ddot{Y}_3, \dots, \ddot{Y}_n ]^T$$

7.- Sustituir los vectores  $\underline{Y}$ ,  $\dot{\underline{Y}}$  y  $\ddot{\underline{Y}}$  obtenidos anteriormente en las ecuaciones 2.4 a 2.6 para obtener los vectores  $\underline{U}$ ,  $\dot{\underline{U}}$  y  $\ddot{\underline{U}}$ .

### 3.- METODO DE LA ACELERACION GENERALIZADA DE NEWMARK

La ecuación de movimiento al establecer el equilibrio dinámico de un sistema discreto es, como ya se vió anteriormente:

$$\underline{M} \ddot{\underline{U}} + \underline{C} \dot{\underline{U}} + \underline{K} \underline{U} = \underline{F}_e \quad (3.1)$$

El Método de Newmark, con base en el Método de la Aceleración lineal, generaliza la variación de la aceleración relativa, al introducir dos parámetros adimensionales cuyos valores se definen de tal forma que el método resulta eficiente.

El Método de la Aceleración Lineal se presenta en el apéndice C de este trabajo, por lo que pasaremos a describir la generalización propuesta por Newmark.

### 3.1 METODO GENERALIZADO.

Newmark generaliza las ecuaciones predictoras C 4 a C 6 al introducir dos parámetros adimensionales  $\beta$  y  $\gamma$  como sigue:

$$\ddot{\underline{U}}_1 = \ddot{\underline{U}}_1 \quad (3.3)$$

$$\dot{\underline{U}}_1 = \dot{\underline{U}}_0 + \Delta t [ 1 - \gamma ] \ddot{\underline{U}}_0 + \Delta t \gamma \ddot{\underline{U}}_1 \quad (3.4)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_0 + \Delta t \dot{\underline{U}}_0 + [ 0.5 - \beta ] \Delta t^2 \ddot{\underline{U}}_0 + \beta \Delta t^2 \ddot{\underline{U}}_1 \quad (3.5)$$

El parámetro  $\beta$  está relacionado con la estabilidad del método y el parámetro  $\gamma$  con el amortiguamiento matemático.

Para el caso  $\beta = 1/6$  y  $\gamma = 1/2$  se tienen las ecuaciones C 4 a C 6 del Método de Aceleración Lineal.

Al sustituir las ecuaciones 3.3 a 3.5 en la ecuación de movimiento al final del paso y al despejar el valor de  $\ddot{\underline{U}}_1$  se obtiene:

$$\ddot{\underline{U}}_1 = \underline{F} [ - \underline{C} \underline{a} - \underline{K} \underline{b} + \underline{F}_{\underline{x}_1} ] \quad (3.6)$$

donde:

$$\underline{F} = [ \underline{M} + \gamma \Delta t \underline{C} + \beta \Delta t^2 \underline{K} ]^{-1} \quad (3.7)$$

$$\underline{a} = \dot{\underline{U}}_0 + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{\underline{U}}_0 \quad (3.8)$$

$$\underline{b} = \underline{U}_0 + \Delta t \dot{\underline{U}}_0 + [0.5 - \beta] \Delta t^2 \ddot{\underline{U}}_0 \quad (3.9)$$

Al sustituir el criterio de Rayleigh en las ecuaciones 3.6 y 3.7 se tiene:

$$\underline{K} \ddot{\underline{U}}_1 = \underline{r} \quad (3.10)$$

donde:

$$\underline{K} = [1 + \gamma \Delta t \alpha] \underline{M} + [\gamma \Delta t \mu + \beta \Delta t^2] \underline{K} \quad (3.11)$$

y

$$\underline{r} = -\alpha \underline{M} \underline{a} - \underline{K} [\mu \underline{a} + \underline{b}] + \underline{F}_1 \quad (3.12)$$

Al resolver la ecuación 3.10, las ecuaciones 3.4 y 3.5 se escriben en forma explícita como sigue:

$$\dot{\underline{U}}_1 = \underline{a} + \gamma \Delta t \ddot{\underline{U}}_1 \quad (3.13)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{b} + \beta \Delta t \ddot{\underline{U}}_1 \quad (3.14)$$

## 3.2 ALGORITMO NUMERICO

El algoritmo numérico para el Método de la Aceleración Generalizada se presenta a continuación:

1.- Se determinan las constantes:

$$E0 = \gamma \Delta t$$

$$E1 = \beta \Delta t \Delta t$$

$$EK1 = 1 - E0 \alpha$$

$$EK2 = E0 \mu + E1$$

$$EA1 = \Delta t - E0$$

$$EB1 = ( 1/2 - \beta ) \Delta t \Delta t$$

2.- Se calcula la matriz  $\underline{K}$

$$\underline{K} = EK1 \underline{M} + EK2 \underline{K}$$

3.- Se trianguliza  $\underline{K}$

Para cada punto del acelerograma realizar:

4.- Determinar los vectores:

$$\underline{a} = \dot{\underline{U}}_0 + EA1 \ddot{\underline{U}}_1$$

$$\underline{b} = \underline{u}_0 + \Delta t \dot{\underline{u}}_0 + EB1 \ddot{\underline{u}}_0$$

$$\underline{r} = -\ddot{\underline{u}}_g \underline{M} - \alpha \underline{M} \underline{a} - \underline{K} [ \mu \underline{a} + \underline{b} ]$$

5.- Resolver el sistemas de ecuaciones:

$$\underline{K} \ddot{\underline{u}}_1 = \underline{r}$$

6.- Obtener los vectores:

$$\dot{\underline{u}}_1 = \underline{a} + E0 \ddot{\underline{u}}_1$$

$$\underline{u}_1 = \underline{b} + E1 \ddot{\underline{u}}_1$$

## 4.- PROGRAMA DE COMPUTADORA

En este capítulo se presenta la forma en que está organizado el programa de computadora aplicando los algoritmos del Método de Superposición Modal y Generalizado de Newmark analizados en los capítulos anteriores. Además, en la parte final del capítulo se presenta el manual del usuario.

### 4.1 EQUIPO DE COMPUTO

Existen en el mercado una gama inmensa de equipos de cómputo que van desde las computadoras personales hasta sistemas personales.

Para ejecutar los programas que a continuación se explican se debe contar, como mínimo, con una microcomputa-

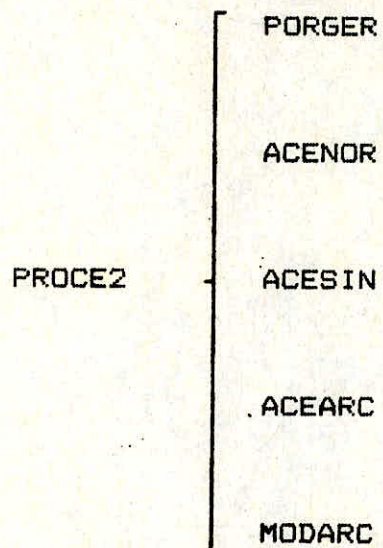
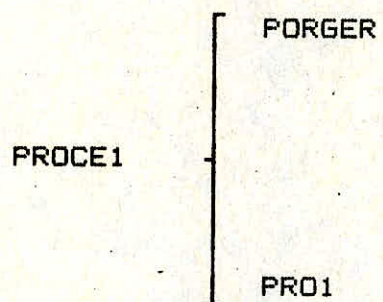
dora o computadora personal con una configuración de 640 Kbytes de memoria RAM, con dos manejadores de diskettes de 3.5 in y de 720 Kbytes de capacidad, dado que los programas que se presentan utilizan aproximadamente 450 Kbytes de memoria y se generan archivos con un gran número de caracteres.

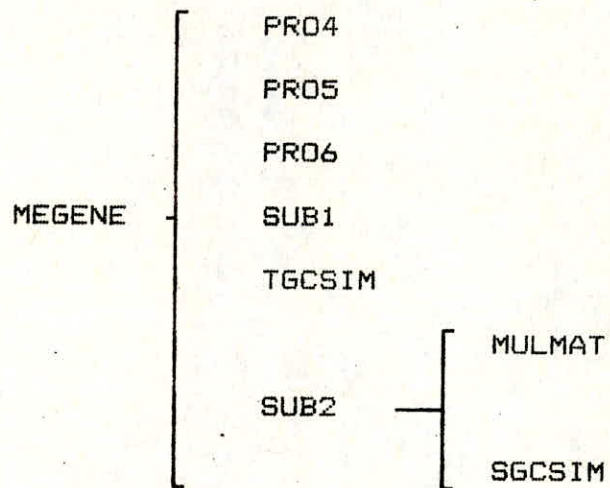
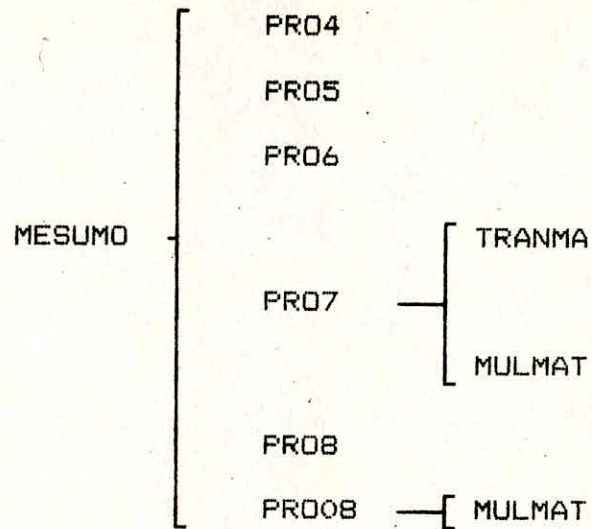
#### **4.2 ORGANIZACION DEL PROGRAMA**

Para resolver la integración de las ecuaciones de movimiento se presenta el problema de optimizar tanto la captura de la información como del proceso de la misma. El lenguaje de programación idóneo para problemas de ingeniería es el compilador de FORTRAN. Una desventaja de este compilador es que no se puede manejar la pantalla para que el ingreso de la información por parte del usuario sea eficiente. Por otro lado en el mercado ya se encuentra a nuestra disposición el compilador de BASIC (TURBOBASIC), que nos permite con gran flexibilidad el manejo de la pantalla.

Por estas razones el programa que se presenta para resolver el problema de la integración de las ecuaciones de movimiento se divide en dos: el ingreso de datos se hace mediante un preprocesador hecho en TURBOBASIC y el proceso de toda la información para resolver el problema se realiza mediante el compilador de FORTRAN.

El programa general se divide en cuatro programas principales, cada uno de los cuales tiene sus correspondientes subrutinas de proceso como se muestra en el esquema siguiente:





A continuación se presenta la explicación de cada una de las subrutinas:

#### Subrutinas del programa PROCE1:

El programa PORGER solo es la carátula de presentación del programa.

El programa PRO1 es en el que se ingresan los datos generales de la estructura a analizar, tales como: pesos, alturas, rigideces y el coeficiente de amortiguamiento crítico.

#### Subrutinas del programa PROCE2:

Este programa aunque también es de ingreso de datos, se halla separado del primero porque en éste sólo se ingresarán datos de acelerogramas y para una estructura dada se puede analizar ésta para diferentes temblores. Entonces una vez ingresado los datos de la estructura, cuando se quiera analizar para diferentes acelerogramas sólo es necesario ingresar los acelerogramas.

En la subrutina ACENOR se ingresan datos de acelerogramas normalizados cuando uno tiene los datos de dicha historia. Estos datos se deben encontrar ya digitizados

porque en él ingresamos el número de datos del acelerograma, el intervalo de tiempo manejado, el tiempo inicial del temblor y los datos propios de aceleraciones del terreno.

En la subrutina ACESIN se ingresan datos de acelerogramas también pero en este caso los datos no están normalizados. En esta subrutina se ingresan: el número de puntos del acelerograma, los puntos del mismo con tiempos y aceleraciones del terreno y el intervalo de tiempo que se utilizará en el proceso. Un proceso interno de la subrutina hace que se forme un acelerograma ya normalizado.

La subrutina ACEARC obtiene la información de archivos de acelerogramas obtenidos a través de un acelerógrafo. En está se indica nada mas el nombre del archivo donde se encuentra la información y se generan tres archivos nuevos donde se guardarán por separado las tres componentes del sismo.

En la subrutina MODARC se modifican archivos. En esta subrutina se pide el nombre del archivo que hay que modificar y de toda esa información cuántos datos se considerarán porque en algunos casos será conveniente quizá no analizar el comportamiento de la estructura con toda la historia de aceleraciones sino nada mas con una parte de ella.

#### Subrutinas del programa MESUMO:

En la subrutina PR04 se forman las matrices de masas y de rigideces a partir de los datos de los pesos de los niveles y de las rigideces de los entrepisos.

En la subrutina PR05 se obtienen las formas modales y los valores de las frecuencias de vibrar al cuadrado de la estructura por analizar. Dado que éste es un problema de valores y vectores característicos se resuelve éste mediante el Método de Jacobi.

En la subrutina PR06 se ordenan en forma ascendente los valores característicos obtenidos en la anterior subrutina dado que los resultados dados en aquella se dan en forma desordenada. Al mismo tiempo se rearreglan los vectores característicos.

En la subrutina PR07 se forma la matriz de Amortiguamientos (C) mediante el método propuesto por Rayleigh. También en esta subrutina se hace el desacoplamiento de las ecuaciones a integrar haciendo uso de la matriz de formas modales para ello.

En la subrutina PR08 se resuelven las ecuaciones desacopladas mediante el Método de Newmark válido para ecuaciones

de un grado de libertad.

En la subrutina PRO08 se hace el acoplamiento de los resultados mediante la matriz de formas modales, se obtienen los resultados promedio de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones.

La subrutina TRANMA forma la matriz transpuesta de una matriz dada. En este caso obtiene la transpuesta de la matriz de formas modales.

En la subrutina MULMAT se realizan multiplicaciones de matrices.

Subrutinas del programa MMEGENE:

En la subrutina SUB1 se forma una matriz cuyos elementos son los coeficientes de las variables del sistema de ecuaciones que se forma para resolver las ecuaciones de movimiento.

En la subrutina SUB2 se forma el vector de resultados para el sistema de ecuaciones mediante los datos del acelerograma y se dan los resultados de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la estructura.

La subrutina TGCSIM es la subrutina de triangulación para resolver sistemas de ecuaciones en los cuales la matriz de coeficientes es simétrica. Se utiliza el método de Gauss-Crout para hacer esta triangulación.

La subrutina SGCSIM es la subrutina de sustituciones (hacia atrás y hacia adelante) para sistemas de ecuaciones algebraicas lineales utilizando el mismo Método de Gauss-Crout.

Para guardar la información tanto de datos generales como de resultados se hace uso de archivos secuenciales en código ASCII.

#### **4.3 MANUAL DEL USUARIO**

A continuación se describe la manera en que el usuario debe ingresar la información ha procesarse tanto de la estructura que se analiza así como de los datos del acelerograma que se utilizarán para resolver la ecuación de movimiento del sistema.

##### **4.3.1 Datos de la ESTRUCTURA**

Para ingresar los datos de la estructura se utiliza el programa PROCE1.EXE. Una vez que se ha cargado el programa, lo primero que aparece en la pantalla es la carátula de

presentación del programa. A continuación aparece en el monitor la siguiente pregunta:

**NOTA**

*Drive para guardar la INFORMACION (A, B, C).....* (1)

(1) Se indica el drive en que se guardará TODA la información. La letra que asignemos no puede ser diferente a estas tres opciones.

Una vez que se indica el drive que se utilizará aparece en la pantalla la siguiente pregunta:

**NOTA**

*Nombre para los ARCHIVOS (4 caracteres).....* (1)

(1) Este nombre debe tener exactamente 4 caracteres. Esta forma de nombrar a los archivos permite guardar la información de varias estructuras sin necesidad de sustituir los datos de un solo archivo cada vez que se ejecute este programa.

Una vez que se ha indicado el nombre de los archivos se presentan las dos siguientes preguntas:

**NOTAS**

*Numero de NIVELES de la ESTRUCTURA* (1)

*Valor del Coef. de Amortiguamiento Critico* (2)

(1) Este valor no puede ser nulo. Indica el número de masas en que se discretiza la estructura.

(2) Este valor es la relación entre el coeficiente de amortiguamiento y el valor del amortiguamiento crítico. Para estructuras de Ingeniería Civil, en general, su valor es menor a 0.1.

La última pantalla que se presenta en este programa para ingreso de datos se da en forma de tabla de la siguiente manera:

<u>D A T O S   G E N E R A L E S</u>				
<i>DATO</i>	<i>NIVEL</i>	<i>PESO</i>	<i>ALTURA</i>	<i>RIGIDEZ</i>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

(1) Este valor lo da el programa y nos sirve como indicador para una posible corrección de su valor.

(2) Este valor también lo da el programa y varía desde uno hasta el número de niveles de la estructura.

(3) En esta columna se ingresan los valores de los pesos de cada uno de los niveles y cuyos valores deben estar expresados en toneladas. Este valor no puede ser nulo.

(4) Altura. Este valor indica la posición que guarda cada uno de los niveles respecto del suelo. Este valor se da en metros y no puede ser nulo.

(5) Rigidez. Este valor no puede valer cero e indica la rigidez de la estructura en el nivel en cuestión. Su valor se

da en ton/cm.

#### 4.3.2 Datos del ACELEROGRAMA.

Para ingresar los datos del acelerograma se utiliza el programa PROCE2.EXE.

La primera pantalla que aparece es nuevamente la carátula de presentación. La razón de que aparezca esta carátula en el programa PROCE1 y en este programa está en que para una estructura dada se pueden manejar diversos acelerogramas o con un acelerograma analizar varias estructuras.

La segunda pantalla que aparece en este programa es la opción para el ingreso de los datos del acelerograma.

#### NOTAS

#### T I P O S   D E   A C E L E R O G R A M A S

- |  |     |
|--|-----|
| 1.- Acelerograma NORMALIZADO             | (1) |
| 2.- Acelerograma NO NORMALIZADO          | (2) |
| 3.- Acelerograma en ARCHIVO              | (3) |
| 4.- Modificación del INTERVALO DE TIEMPO | (4) |
| 5.- SALIR                                | (5) |

(1) Esta opción permite ingresar punto por punto cada uno de los datos de un acelerograma en el cual aquellos están espaciados a iguales intervalos de tiempo (acelerograma digitizado).

(2) En este caso también se pueden ingresar punto por punto los datos de un acelerograma pero dichos puntos NO están digitizados. Un proceso interno nos permite digitizar los puntos ingresados.

(3) Esta opción permite utilizar acelerogramas que se encuentran en archivos y que fueron capturados por medio de un acelerógrafo.

(4) Esta opción es para poder utilizar un acelerograma ya archivado y del cual sólo es de interés una parte de él.

(5) Por medio de esta opción se puede salir del programa.

Después de estas opciones se vuelve a preguntar:

**NOTAS**

*Drive para guardar la INFORMACION (A, B, C).....* (1)

(1) El drive que se maneje debe ser el mismo que el que se indicó en el programa PROCE1.

La siguiente pantalla es, según la opción elegida:

**NOTAS**

ACELEROGRAMA NORMALIZADO

*Nombre de ACELEROGRAMA (4 caracteres).....* (1)

*Cuantos Datos tiene el ACELEROGRAMA.....* (2)

*Cual es el Intervalo de Tiempo.....* (3)

(1) En este caso se da el nombre del archivo. El nombre debe

tener 4 caracteres exactamente.

(2) En este renglón se pregunta el número de puntos del acelerograma que se va a dar. Este valor no puede ser nulo.

(3) En este caso se indica el tamaño de paso para la integración de las ecuaciones. Este valor no puede ser nulo.

La siguiente pantalla es:

<u>ACELEROGRAMA NORMALIZADO</u>			
<u>DATO</u>	<u>PUNTO</u>	<u>TIEMPO</u>	<u>ACELERACION</u>
(1)	(2)	(3)	(4)

(1) El dato sólo indica la posición de los puntos del acelerograma para una posible corrección posterior. Este valor lo da el programa.

(2) En este caso el programa indica el número del punto del acelerograma que se está introduciendo.

(3) En esta columna el único valor que se ingresa es el valor del tiempo inicial (en seg) dado que el acelerograma está normalizado y se conoce el valor del intervalo de tiempo.

(4) Aquí se ingresan los valores de la aceleración del terreno para cada punto. Este valor se da en  $m/s^2$ .

Si se elige la segunda opción se tiene entonces la siguiente pantalla:

ACELEROGRAMA NO NORMALIZADO

Nombre del ARCHIVO (4 caracteres)	(1)
Cuantos datos son	(2)
Cual es el Intervalo de Tiempo	(3)
Cual es el valor del ULTIMO Tiempo	(4)

(1) Se indica el nombre del archivo. Se dan 4 caracteres exactamente.

(2) Se indica el número de datos del acelerograma. Este valor no puede ser nulo.

(3) Se indica el intervalo de tiempo en el que se va a normalizar el acelerograma que se ingresa. No puede ser nulo este valor.

(4) Este valor indica el valor del tiempo del último punto del acelerograma que se ingresa. Este valor sirve para hacer cálculos internos y formar un acelerograma normalizado. No puede ser cero este valor.

Después de haber ingresado los anteriores datos, se tiene la siguiente pantalla que es:

ACELEROGRAMA NO NORMALIZADO

DATO	PUNTO	TIEMPO	ACELERACION
(1)	(2)	(3)	(4)

(1) Este valor lo indica el programa. Sirve de ayuda para

posibles correcciones.

(2) Este valor indica el número del punto del acelerograma que se está ingresando.

(3) En este punto se indica el valor de los tiempos de cada uno de los puntos del acelerograma. Se da en segundos y los valores no pueden ser ni iguales ni negativos.

(4) Valor de la aceleración del terreno en cada uno de los puntos del acelerograma. Los valores se dan en  $m/seg^2$ .

Si dentro de las opciones de este segundo programa (PROCE2) escogimos la opción tres se tiene que la primera pantalla es:

**NOTAS**

*Drive para guardar la INFORMACION (A, B).....* (1)

(1) Indica el drive en donde se grabarán los archivos para los procesos.

La siguiente pantalla que se presenta es:

**NOTAS**

ACELEROGRAMA EN ARCHIVO

*Nombre del archivo VIEJO.....* (1)

*Nombre del archivo NUEVO (3 caracteres).....* (2)

*Los Archivos creados se llaman.....* (3)

*Cual es el INTERVALO de TIEMPO.....* (4)

(1) Esta pregunta se refiere al archivo que está almacenado y que tiene las tres componentes del movimiento sísmico. Este archivo se obtuvo por medio de instrumentos sísmicos.

(2) Este nombre es el que tendrán c/u de los tres archivos en que se divide el archivo anterior. El nombre debe tener 3 caracteres exactamente.

(3) Son los nombres (de 4 caracteres) que tienen c/u de los archivos en que se divide el archivo fuente. Estos datos los da el programa.

(4) Este dato se refiere al espaciamiento que tienen los valores de aceleración dados en el archivo fuente. No puede ser cero este valor.

Si se elige la ultima opción, tenemos que la primera pantalla que se presenta es:

**NOTAS**

*Drive para guardar la INFORMACION (A, B).....* (1)

(1) Se indica el drive en el que se almacenará toda la información.

La siguiente pantalla que se presenta es:

**NOTAS**

CREACION DE UN NUEVO ACELROGRAMA

*Nombre del Archivo VIEJO.....* (1)

*Nombre del Archivo NUEVO (4 caracteres).....* (2)

<i>Intervalo de Tiempo Viejo</i> .....	(3)
<i>Intervalo de Tiempo Nuevo</i> .....	(4)
<i>Tiempo Inicial</i> .....	(5)
<i>Tiempo Final</i> .....	(6)

(1) Indica el nombre del archivo que tiene sólo una de las componentes del sismo.

(2) Se tiene que indicar el nombre del nuevo archivo que guardará la información. Este archivo se crea como opción de utilizar el archivo original con un diferente intervalo de tiempo o cuando sólo se quiere manejar una parte de la información.

(3) Este valor se refiere al intervalo de tiempo que tiene el archivo original. Este valor no puede ser cero.

(4) Este valor indica el nuevo intervalo de tiempo a manejar en el archivo que se va a crear. Su valor no puede ser cero y puede ser el mismo que en el archivo original.

(5) Este valor indica el tiempo que se considera como inicial para el nuevo archivo y puede ser el mismo que en el archivo original.

(6) Este valor indica el tiempo que se considera como el último para el nuevo acelerograma. Puede ser el mismo valor que en el archivo original y no puede ser cero.

#### 4.3.3 PROCESO DE LA INFORMACION

Para hacer los cálculos del problema se tienen dos opciones como ya vimos anteriormente: el Método de Superposición Modal y el Método Generalizado de Newmark.

Una vez que se ha decidido qué método se utilizará se carga el programa correspondiente a cada método (MESUMO para el Método de Superposición y MEGENE para el Método de Newmark) desde DOS pues ambos son programas ejecutables.

La pantalla que aparece una vez que se ha cargado el programa elegido es la misma para ambos métodos, y es la siguiente:

#### NOTAS

*En que DRIVE se encuentra la INFORMACION (A, B)..... (1)*

*Nombre del ARCHIVO de DATOS GENERALES (4 caracteres)... (2)*

*Nombre del ARCHIVO del ACELEROGRAMA (4 caracteres)..... (3)*

*Nombre del ARCHIVO de RESULTADOS (4 caracteres)..... (4)*

(1) En esta pregunta se debe indicar en que DRIVE se grabó la información dada en los programas de ingreso de datos.

(2) En esta pregunta se ingresa el nombre del archivo en donde se encuentran los datos propios de la estructura. Se deben indicar los mismos 4 caracteres que se ingresaron en el programa PROCE1.

(3) En esta pregunta se indica el nombre asignado al archivo de los datos del acelerograma. Los 4 caracteres que se piden son los mismos que se indicaron en el programa PROCE2.

(4) Aquí se asigna el nombre para los archivos de salida o de resultados. Deben ser 4 caracteres exactamente.

Como ayuda al usuario se presentan las tablas 4.1 a 4.5 para el ingreso de datos según se describió anteriormente.

**LISTADO DEL PROGRAMA**

```

REM *****
REM *****
REM **
REM **          METODOS DE ANALISIS SISMICO          **
REM **
REM **          GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA          **
REM **
REM *****
REM *****
CALL FORGER
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 12,15:INPUT "Drive para guardar la INFORMACION (A, B).....",DR$
010 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 12,15:PRINT "Nombre para los ARCHIVOS (4 caracteres)....."
LOCATE 12,63:INPUT "",NOM$
IF LEN(NOM$)=4 THEN 1015 ELSE 1010
015 LOCATE 20,27:PRINT "Desea corregir S=1 N=2"
020 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 1030 ELSE 1020
030 IF VAL(P$)=1 THEN 1010
040 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 12,15:PRINT "Numero de NIVELES de la ESTRUCTURA....."
LOCATE 12,63:INPUT "",N
LOCATE 14,15:PRINT "Valor del AMORTIGUAMIENTO CRITICO....."
LOCATE 14,63:INPUT "",GAMA
LOCATE 20,27:PRINT "Desea corregir S=1 N=2"
050 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 1060 ELSE 1050
060 IF VAL(P$)=1 THEN 1040
DIM W(N),H(N),K(N)
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Inicio captura de DATOS GENERALES...";TIME$
CALL PRO1(N,W(),H(),K())
A$=DR$+STRING$(1,58)+NOM$+STRING$(1,49)
OPEN A$ FOR OUTPUT AS #1
PRINT#1,USING"###.###";N
PRINT#1,USING"#.####";GAMA
FOR I=1 TO N
PRINT#1,USING"#####.#####";W(I)
NEXT I
FOR I=1 TO N
PRINT#1,USING"#####.#####";H(I)
NEXT I
FOR I=1 TO N
PRINT#1,USING"#####.#####";K(I)
NEXT I
CLOSE#1

```

```

B$=DR$+STRING$(1,58)+NOM$+STRING$(1,51)
OPEN B$ FOR OUTPUT AS #2
PRINT#2,"Numero de NIVELES.....";USING"###";N
PRINT#2,
PRINT#2,"Amortiguamiento Critico.....";USING"###.####";GAMA
PRINT#2,
PRINT#2,"NIVEL      PESOS      ALTURAS      RIGIDECES"
PRINT#2,"          (ton)        (m)          (ton/cm)"
FOR I=1 TO N
PRINT#2,USING"###";I;USING"#####.##";W(I);USING"#####.##";H(I);
USING"#####.##";K(I)
NEXT I
CLOSE#2
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Fin captura de DATOS GENERALES...";TIME$
DELAY 2
CLS
$INCLUDE "FORGER.BAS"
$INCLUDE "PRO1.BAS"
END

```

```

SUB FORGER
CLS
A$=STRING$(1,201)+STRING$(78,205)+STRING$(1,187)
LOCATE 1,1:PRINT A$
B$=STRING$(1,186)+STRING$(78,32)+STRING$(1,186)
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,1:PRINT B$
NEXT I
C$=STRING$(1,200)+STRING$(78,205)+STRING$(1,188)
LOCATE 22,1:PRINT C$
A1$=STRING$(1,218)+STRING$(1,196)+STRING$(1,191)
A2$=STRING$(1,218)+STRING$(9,196)+STRING$(1,191)
A3$=STRING$(1,179)+STRING$(1,32)+STRING$(1,179)
A4$=STRING$(1,192)+STRING$(9,196)+STRING$(1,217)
A5$=STRING$(1,179)+STRING$(9,32)+STRING$(1,179)
B2$=STRING$(1,218)+STRING$(7,196)+STRING$(1,191)
B4$=STRING$(1,192)+STRING$(7,196)+STRING$(1,217)
B1$=STRING$(1,192)+STRING$(1,196)+STRING$(1,217)
C2$=STRING$(1,218)+STRING$(5,196)+STRING$(1,191)
C3$=STRING$(1,192)+STRING$(5,196)+STRING$(1,217)
E$=STRING$(1,32)
LOCATE 2,4:PRINT A1$+E$+A1$+E$+A1$+E$+A2$
LOCATE 3,4:PRINT A3$+E$+A3$+E$+A3$+E$+A4$
LOCATE 4,4:PRINT A3$+E$+A3$+E$+A3$
LOCATE 5,4:PRINT A3$+E$+A3$+E$+A3$+E$+E$+E$+B2$
LOCATE 6,4:PRINT A3$+E$+A3$+E$+B1$+E$+E$+E$+B4$
LOCATE 7,4:PRINT A3$+E$+B1$
LOCATE 8,4:PRINT A3$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+C2$
LOCATE 9,4:PRINT B1$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+E$+C3$
NOMPRO$=" PROGRAMA DE ANALISIS SISMICO "
NOMP$=" METODO DE SUPERPOSICION MODAL Y METODO GENERALIZADO DE NEWMARK "
AUTOR$=" GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA "
VER$=" VERSION 1.0 "
FECHA$=" PUEBLA, MAYO DE 1990 "
1=LEN(NOMPRO$)
2=LEN(NOMP$)
3=LEN(AUTOR$)
4=LEN(VER$)
5=LEN(FECHA$)
1=INT((80-A1)/2)
2=INT((80-A2)/2)
3=INT((80-A3)/2)
4=INT((80-A4)/2)
5=INT((80-A5)/2)
LOCATE 0,7:LOCATE 12,B1:PRINT NOMPRO$
LOCATE 13,B2:PRINT NOMP$:COLOR 7,0
LOCATE 16,B3:PRINT AUTOR$
LOCATE 19,B4:PRINT VER$
LOCATE 20,B5:PRINT FECHA$
DELAY 3
END SUB

```

REM PROGRAMA DE INGRESO DE DATOS GENERALES

REM SUBROUTINA PRO1.BAS

SUB PRO1(N,W(1),H(1),K(1))

DELAY 2

FOR I=2 TO 21

LOCATE I,2:PRINT STRING\$(78,32)

NEXT I

LOCATE 2,25:PRINT "D A T O S        G E N E R A L E S"

LOCATE 3,2:PRINT STRING\$(78,196)

LOCATE 4,2:PRINT "DATO"

LOCATE 4,15:PRINT "NIVEL":LOCATE 4,33:PRINT "PESO"

LOCATE 4,50:PRINT "ALTURA":LOCATE 4,70:PRINT "RIGIDEZ"

LOCATE 5,33:PRINT "(ton)":LOCATE 5,51:PRINT "(m)"

LOCATE 5,70:PRINT "(ton/cm)"

R=7:S=1:T=0

FOR I=1 TO N

LOCATE R,2:PRINT S:LOCATE R,17:PRINT I:LOCATE R,34:INPUT "",W(I)

LOCATE R,51:INPUT "",H(I):LOCATE R,72:INPUT "",K(I)

R=R+1

S=S+1

IF R=19 OR I=N THEN 2000 ELSE 2100

000 LOCATE 20,2:PRINT "Desea corregir S=1 N=2 "

020 P\$=INKEY\$

IF VAL(P\$)=1 OR VAL(P\$)=2 THEN 2040 ELSE 2020

040 IF VAL(P\$)=2 THEN 2080

060 LOCATE 21,2:PRINT "Que dato desea corregir "

LOCATE 21,27:INPUT "",M

IF M>13 OR M<1 THEN 2060

FOR O=20 TO 21

LOCATE O,2:PRINT STRING\$(78,32)

NEXT O

M1=M+12\*T

LOCATE M+6,34:INPUT "",W(M1):LOCATE M+6,51:INPUT "",H(M1)

LOCATE M+6,72:INPUT "",K(M1)

GOTO 2000

080 FOR J=6 TO 21

LOCATE J,2:PRINT STRING\$(78,32)

NEXT J

R=7:S=1:T=T+1

100 NEXT I

REM VERIFICACION DE DATOS

FOR I=4 TO 21

LOCATE I,2:PRINT STRING\$(78,32)

NEXT I

LOCATE 4,5:PRINT "NIVEL":LOCATE 4,25:PRINT "PESO"

LOCATE 4,45:PRINT "ALTURA":LOCATE 4,65:PRINT "RIGIDEZ"

LOCATE 5,25:PRINT "(ton)":LOCATE 5,46:PRINT "(m)"

LOCATE 5,65:PRINT "(ton/cm)"

R=7

FOR I=1 TO N+1

IF R=19 OR I=N+1 THEN 2120 ELSE 2140

120 LOCATE 21,2:PRINT "Presione <RETURN> para continuar "

LOCATE 21,36:INPUT "",A

FOR J=6 TO 21

LOCATE J,2:PRINT STRING\$(78,32)

```
NEXT J
R=6
IF I=N+1 THEN 2160
2140 LOCATE R,5:PRINT I
LOCATE R,23:PRINT USING"###.###";W(I)
LOCATE R,43:PRINT USING"###.###";H(I)
LOCATE R,64:PRINT USING"###.###";K(I)
R=R+1
2160 NEXT I
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Se esta guardando la informacion en ARCHIVO"
END SUB
```

```

REM *****
REM *****
REM **
REM **          METODOS DE ANALISIS SISMICO          **
REM **
REM **          GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA          **
REM **
REM *****
REM *****

```

```

CALL PORGER
100 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 2,15:PRINT "T I P O S          D E          A C E L E R O G R A M A S"
LOCATE 5,15:PRINT "1.- Acelerograma NORMALIZADO"
LOCATE 7,15:PRINT "2.- Acelerograma NO NORMALIZADO"
LOCATE 9,15:PRINT "3.- Acelerograma en ARCHIVO"
LOCATE 11,15:PRINT "4.- Modificacion del INTERVALO DE TIEMPO"
LOCATE 13,15:PRINT "5.- SALIR"
LOCATE 17,15:PRINT "OPCION:"
LOCATE 17,23:INPUT "",OP
IF OP=5 THEN 1600
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 12,15:INPUT "Drive para guardar la INFORMACION (A, B).....",DR$
ON OP GOTO 1200,1300,1400,1500
200 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Inicio captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$
CALL ACENOR(DR$)
LOCATE 11,20:PRINT "Fin captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$
DELAY 2
GOTO 1100
300 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Inicio captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$
CALL ACESIN(DR$)
LOCATE 11,20:PRINT "Fin captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$
DELAY 2
GOTO 1100
400 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Inicio captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$
CALL ACEARC(DR$)
LOCATE 11,20:PRINT "Fin captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$
DELAY 2
GOTO 1100
500 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Inicio captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$

```

```
CALL MODARC(DR$)
LOCATE 11,20:PRINT "Fin captura de DATOS ACELEROGRAMA...";TIME$
DELAY 2
GOTO 1100
$INCLUDE "PORGER.BAS"
$INCLUDE "ACENOR.BAS"
$INCLUDE "ACESIN.BAS"
$INCLUDE "ACEARC.BAS"
$INCLUDE "MODARC.BAS"
1600 CLS
END
```

```

REM SUBROUTINA DE INGRESO DE DATOS
REM ACELEROGRAMA NORMALIZADO
SUB ACENOR(DR$)
DELAY 2
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 2,20:PRINT "A C E L E R O G R A M A      N O R M A L I Z A D O"
LOCATE 3,2:PRINT STRING$(78,196)
300 FOR I=4 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 8,15:PRINT "Nombre del ACELEROGRAMA (4 caracteres)....."
LOCATE 8,60:INPUT "",NOM$
LOCATE 10,15:PRINT "Cuantos Datos tiene el ACELEROGRAMA....."
LOCATE 10,60:INPUT "",N1
LOCATE 12,15:PRINT "Cual es el Intervalo de Tiempo....."
LOCATE 12,60:INPUT "",DT
LOCATE 20,20:PRINT "Desea corregir  S=1  N=2"
400 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 2500 ELSE 2400
500 IF VAL(P$)=1 THEN 2300
DIM A(N1),T(N1)
FOR I=4 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 4,5:PRINT "DATO":LOCATE 4,20:PRINT "PUNTO"
LOCATE 4,35:PRINT "TIEMPO":LOCATE 4,55:PRINT "ACELERACION"
LOCATE 5,35:PRINT "(seg)":LOCATE 5,57:PRINT "(m/s^2)"
LOCATE 6,2:PRINT STRING$(78,32)
LOCATE 7,8:PRINT "1":LOCATE 7,22:PRINT "1"
LOCATE 7,36:INPUT "",T(1)
LOCATE 7,59:INPUT "",A(1)
R=8:S=2:T=0
FOR I=2 TO N1
T(I)=T(I-1)+DT
LOCATE R,7:PRINT S:LOCATE R,21:PRINT I
LOCATE R,34:PRINT USING "###.###";T(I)
LOCATE R,59:INPUT "",A(I)
R=R+1
S=S+1
IF R=18 OR I=N1 THEN 3000 ELSE 3100
000 LOCATE 20,2:PRINT "Desea corregir datos  S=1  N=2"
020 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 3040 ELSE 3020
040 IF VAL(P$)=2 THEN 3080
060 LOCATE 21,2:PRINT "Que dato desea corregir "
LOCATE 21,26:INPUT "",M
IF M>11 OR M<1 THEN 3060
FOR O=20 TO 21
LOCATE O,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT O
M1=M+11*T
LOCATE M+6,59:INPUT "",A(M1)
GOTO 3000

```

```

3080 FOR J=7 TO 21
LOCATE J,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT J
R=8:S=1:T=T+1
3100 NEXT I
REM VERIFICACION DE DATOS
FOR I=4 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 4,20:PRINT "PUNTO"
LOCATE 4,40:PRINT "TIEMPO"
LOCATE 4,60:PRINT "ACELERACION"
LOCATE 5,40:PRINT "(seg)"
LOCATE 5,61:PRINT "(m/s^2)"
R=7
FOR I=1 TO N1
LOCATE R,22:PRINT I
LOCATE R,40:PRINT USING "##.###";T(I)
LOCATE R,64:PRINT USING "###.###";A(I)
IF R=19 OR I=N1 THEN 3120 ELSE 3140
3120 LOCATE 21,2:INPUT "Presione <RETURN> para continuar ",D
FOR J=7 TO 21
LOCATE J,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT J
R=7
GOTO 3160
3140 R=R+1
3160 NEXT I
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Se esta guardando la informacion en ARCHIVO"
A$=DR$+STRING$(1,58)+NOM$
OPEN "0",2,A$
PRINT#2,USING"#####,#";N1
PRINT#2,USING"#.###";DT
FOR I=1 TO N1
PRINT#2,USING"#####.#####";A(I)
NEXT I
CLOSE#2
END SUB

```

```

REM SUBROUTINA DE INGRESO DE DATOS ACELEROGRAMA
REM ACELEROGRAMA NO NORMALIZADO
SUB ACESIN(DR#)
DELAY 2
3940 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 2,20:PRINT "A C E L E R O G R A M A"
LOCATE 2,46:PRINT "N O   N O R M A L I Z A D O"
LOCATE 3,2:PRINT STRING$(78,196)
LOCATE 8,15:INPUT "Nombre del Archivo (4 caracteres).....",A$
LOCATE 10,15:INPUT "Cuantos datos son.....",N
LOCATE 12,15:INPUT "Cual es el Intervalo de Tiempo.....",DT
LOCATE 14,15:INPUT "Cual es el valor del ULTIMO Tiempo.....",UT
LOCATE 20,20:PRINT "Desea corregir datos  S=1  N=2"
3960 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 3980 ELSE 3960
3980 IF VAL(P$)=1 THEN 3940
DIM T(N),ATE(N)
N1=INT(UT/DT)+1
DIM T1(N1),A1(N1)
FOR I=4 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 4,5:PRINT "DATO":LOCATE 4,20:PRINT "PUNTO"
LOCATE 4,40:PRINT "TIEMPO":LOCATE 4,60:PRINT "ACELERACION"
LOCATE 5,40:PRINT "(seg)":LOCATE 5,61:PRINT "(m/s^2)"
R=8:S=1:T=0
FOR I=1 TO N
LOCATE R,5:PRINT S:LOCATE R,21:PRINT I
LOCATE R,41:INPUT "",T(I):LOCATE R,64:INPUT "",ATE(I)
R=R+1
S=S+1
IF R=18 OR I=N THEN 4000 ELSE 4100
000 LOCATE 20,2:PRINT "Desea corregir datos  S=1  N=2"
020 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 4040 ELSE 4020
040 IF VAL(P$)=2 THEN 4080
060 LOCATE 21,2:PRINT "Que dato desea corregir"
LOCATE 21,26:INPUT "",M
IF M>11 OR M<1 THEN 4060
FOR O=20 TO 21
LOCATE O,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT O
M1=M+10*T
LOCATE M+7,41:INPUT "",T(M1)
LOCATE M+7,64:INPUT "",ATE(M1)
GOTO 4000
080 FOR J=7 TO 21
LOCATE J,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT J
R=8:S=1:T=T+1
100 NEXT I
REM VERIFICACION DE DATOS
FOR I=6 TO 21

```

```

LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
R=7
FOR I=1 TO N
LOCATE R,21:PRINT I:LOCATE R,41:PRINT USING"###.###";T(I)
LOCATE R,62:PRINT USING"###.###";ATE(I)
R=R+1
IF R=20 OR I=N THEN 4120 ELSE 4140
1120 LOCATE 21,2:PRINT "Presione <RETURN> para continuar"
LOCATE 21,35:INPUT "",TT
FOR J=7 TO 21
LOCATE J,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT J
R=7
1140 NEXT I
T1(1)=T(1)
A1(1)=ATE(1)
J=1
FOR I=1 TO N-1
P=(ATE(I+1)-ATE(I))/(T(I+1)-T(I))
1160 A=P*(T1(J)-T(I))+ATE(I)
J=J+1
A1(J)=A
T1(J)=T1(J-1)+DT
IF T1(J)>T(I+1) THEN 4180
GOTO 4160
1180 NEXT I
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Se esta guardando la informacion en ARCHIVO"
B$=DR$+STRING$(1,58)+A$
OPEN "O",2,B$
PRINT#2,USING"#####.#";N1
PRINT#2,USING"#.###";DT
FOR I=1 TO N1
PRINT#2,USING"###.#####";A1(I)
NEXT I
CLOSE#2
END SUB

```

```

REM PROGRAMA PARA OBTENER UN ACELEROGRAMA DE UN ARCHIVO
SUB ACEARC(DR$)
DELAY 2
000 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 2,20:PRINT "A C E L E R O G R A M A      E N      A R C H I V O"
LOCATE 3,2:PRINT STRING$(78,196)
LOCATE 7,15:INPUT "Nombre del archivo VIEJO .....",A1$
LOCATE 9,15:INPUT "Nombre del archivo NUEVO (3 caracteres).....",C$
D1$=C$+STRING$(1,49)
E1$=C$+STRING$(1,50)
F1$=C$+STRING$(1,51)
D$=DR$+STRING$(1,58)+D1$
E$=DR$+STRING$(1,58)+E1$
F$=DR$+STRING$(1,58)+F1$
LOCATE 11,15:PRINT "Los Archivos creados se llaman.....";D1$
LOCATE 12,60:PRINT E1$
LOCATE 13,60:PRINT F1$
LOCATE 15,15:INPUT "Cual es el INTERVALO de TIEMPO.....",DT
LOCATE 20,20:PRINT "Desea corregir S=1 N=2"
010 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 5020 ELSE 5010
020 IF VAL(P$)=1 THEN 5000
A$=DR$+STRING$(1,58)+A1$
OPEN "I",1,A$
INPUT#1,C1$
S=1
WHILE NOT EOF(1)
INPUT#1,A,B,C
S=S+1
WEND
LOCATE 20,20:PRINT "El ARCHIVO tiene ";S;" Datos"
CLOSE #1
OPEN "I",1,A$
INPUT#1,C1$
S1=S-1
DIM A(S1),B(S1),C(S1)
FOR I=1 TO S1
INPUT#1,A(I),B(I),C(I)
NEXT I
CLOSE#1
LOCATE 20,20:PRINT "Cambie el disco de la unidad ";DR$
LOCATE 21,20:INPUT "Presione <RETURN> ";RERE
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Se esta guardando la informacion en ARCHIVO"
OPEN "O",2,D$
PRINT#2,USING "#####.#";S1
PRINT#2,USING "#.###";DT
FOR I=1 TO S1
PRINT#2,USING "#####.#####";A(I)
NEXT I
CLOSE#2

```

```
OPEN "0",2,E$
PRINT#2,USING "#####.#";S1
PRINT#2,USING "#.###";DT
FOR I=1 TO S1
PRINT#2,USING "#####.#####";B(I)
NEXT I
CLOSE#2
OPEN "0",2,F$
PRINT#2,USING "#####.#";S1
PRINT#2,USING "#.###";DT
FOR I=1 TO S1
PRINT#2,USING "#####.#####";C(I)
NEXT I
CLOSE#2
END SUB
```

```

REM PROGRAMA QUE CREA UN ACELEROGRAMA A PARTIR
REM DE LOS DATOS DE OTRO ACELEROGRAMA
SUB MODARC(DR$)
DELAY 2
6000 FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 2,20:PRINT "CREACION DE UN NUEVO ACELEROGRAMA"
LOCATE 3,2:PRINT STRING$(78,196)
LOCATE 6,15:PRINT "Nombre del Archivo VIEJO....."
LOCATE 6,60:INPUT "",NOMVIE$
LOCATE 8,15:PRINT "Nombre del Archivo NUEVO (4 caracteres)....."
LOCATE 8,60:INPUT "",NOMNUE$
LOCATE 10,15:PRINT "Intervalo de Tiempo Viejo....."
LOCATE 10,60:INPUT "",DTV
LOCATE 12,15:PRINT "Intervalo de Tiempo Nuevo....."
LOCATE 12,60:INPUT "",DTN
LOCATE 14,15:PRINT "Tiempo Inicial....."
LOCATE 14,60:INPUT "",TI
LOCATE 16,15:PRINT "Tiempo Final....."
LOCATE 16,60:INPUT "",TF
LOCATE 20,20:PRINT "Desea corregir S=1 N=2"
6020 P$=INKEY$
IF VAL(P$)=1 OR VAL(P$)=2 THEN 6040 ELSE 6020
6040 IF VAL(P$)=1 THEN 6000
A$=DR$+STRING$(1,58)+NOMVIE$
OPEN "I",1,A$
INPUT#1,S
INPUT#1,DT
DIM A(S)
FOR I=1 TO S
INPUT#1,A(I)
NEXT I
CLOSE#1
C$=DR$+STRING$(1,58)+NOMNUE$
NI=TI/DTV
NF=TF/DTV
D=DTN/DTV
S1=INT((NF-NI)/D)
DIM B(S1)
FOR I=2 TO 21
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,32)
NEXT I
LOCATE 11,20:PRINT "Se esta guardando la informacion en ARCHIVO"
OPEN "O",2,C$
PRINT#2,USING"#####.#";S1
PRINT#2,USING"###.#";DTN
K=1
FOR J=NI TO NF STEP D
B(K)=A(J)
PRINT#2,USING"#####.#####";B(K)
K=K+1
NEXT J
CLOSE#2
END SUB

```

```

INTERFACE TO SUBROUTINE TIME(N,STR)
CHARACTER*10 STR [NEAR,REFERENCE]
INTEGER*2 N [VALUE]
END
C   PROGRAMA PRINCIPAL DE CALCULOS
C   ANALISIS SISMICO
C   METODO DE SUPERPOSICION MODAL
C   GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA
EXTERNAL PRO4,PRO5,PRO6,PRO7,PRO8,PRO08
DIMENSION A(30000)
CHARACTER*1 DRI
CHARACTER*4 NAM,NEM,NOM
CHARACTER*6 CORA
CHARACTER*7 CHAPA
CHARACTER*10 TSTR
WRITE(*,5)
READ(*,8)DRI
WRITE(*,10)
READ(*,20)NAM
WRITE(*,15)
READ(*,20)NOM
WRITE(*,16)
READ(*,20)NEM
CHAPA(1:1)=DRI
CHAPA(2:1+1)=CHAR(58)
CHAPA(3:2+4)=NAM
CHAPA(7:6+1)=CHAR(49)
OPEN(1,FILE=CHAPA,STATUS='OLD')
READ(1,31)A(1)
READ(1,32)GAMA
N=INT(A(1))
J=2
DO 21 I=1,N
READ(1,70)A(J)
IF(I.EQ.N)GOTO 11
J=J+N+1
GOTO 21
11  J=J+1
21  CONTINUE
DO 30 I=1,N
READ(1,70)A(J)
J=J+1
30  CONTINUE
DO 40 I=1,N
READ(1,70)A(J)
IF(I.EQ.N)GOTO 35
J=J+N+1
GOTO 40
35  J=J+1
40  CONTINUE
CLOSE(1)
N1=2
N2=N1+N*N
N3=N2+N
N4=N3+N*N

```

```

N5=N4+N*N
N6=N5+N*N
N7=N6+N*N
N8=N7+N
N9=N8+N
N10=N9+N*N
N11=N10+N*N
N12=N11+N*N
N13=N12+N
N14=N13+N
N15=N14+N
N16=N15+1
N17=N16+1
CALL PR04(A(N1),A(N2),A(N3),A(N4),A(N5),N)
WRITE(*,1000)
1000 FORMAT(3X,' Inicio del Calculo de las FORMAS MODALES ')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CALL PR05(A(N5),A(N4),A(N6),A(N7),A(N8),N)
WRITE(*,1010)
1010 FORMAT(3X,' Fin del Calculo de las FORMAS MODALES ')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CALL PR06(A(N7),A(N6),N,NAM,DRI)
WRITE(*,1020)
1020 FORMAT(3X,' Inicio del DESACOPLAMIENTO de las ECUACIONES ')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CALL PR07(GAMA,A(N1),A(N3),A(N7),A(N6),A(N9),A(N10),A(N11),A(N12),
*A(N13),A(N14),N,NAM,DRI)
WRITE(*,1030)
1030 FORMAT(3X,' Fin del DESACOPLAMIENTO de las ECUACIONES ')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CORA(1:1)=DRI
CORA(2:1+1)=CHAR(58)
CORA(3:2+4)=NOM
OPEN(2,FILE=CORA,STATUS='OLD')
READ(2,80)A(N15)
N1=INT(A(N15))
READ(2,90)A(N16)
N18=N17+N1
N19=N18+N1
N20=N19+N1
N21=N20+N1
N22=N21+N*N1
N23=N22+N*N1
N24=N23+N*N1
N25=N24+N*N1
N26=N25+N
N27=N26+N
N28=N27+N
DO 81 I=N17,N18-1
READ(2,120)A(I)
A(I)=100*A(I)

```

```

81   CONTINUE
      CLOSE(2)
      WRITE(*,1040)
1040  FORMAT(3X,' Inicio de la SOLUCION de las ECUACIONES ')
      CALL TIME(10,TSTR)
      WRITE(*,*)TSTR
      CALL PRO8(A(N16),A(N17),A(N18),A(N19),A(N20),N,N1,NAM,NEM,DRI)
      WRITE(*,1050)
1050  FORMAT(3X,' Fin de la SOLUCION de las ECUACIONES ')
      CALL TIME(10,TSTR)
      WRITE(*,*)TSTR
      WRITE(*,1060)
1060  FORMAT(3X,' Inicio ACOPLAMIENTO de RESULTADOS ')
      CALL TIME(10,TSTR)
      WRITE(*,*)TSTR
      CALL PRO8(A(2),A(N6),A(N21),A(N22),A(N23),A(N24),A(N25),A(N26),A(
*N27),N,N1,NEM,DRI)
      WRITE(*,1070)
1070  FORMAT(3X,' Fin ACOPLAMIENTO de RESULTADOS ')
      CALL TIME(10,TSTR)
      WRITE(*,*)TSTR
5     FORMAT(3X,/, ' En que DRIVE se encuentra la INFORMACION (A, B)')
8     FORMAT(A1)
10    FORMAT(3X,/, ' Nombre del ARCHIVO de DATOS GENERALES (4 caracteres)
*')
15    FORMAT(3X,/, ' Nombre del ARCHIVO del ACELEROGRAMA (4 caracteres)')
16    FORMAT(3X,/, ' Nombre del ARCHIVO de RESULTADOS (4 caracteres)')
20    FORMAT(A4)
31    FORMAT(F7.3)
32    FORMAT(F6.4)
70    FORMAT(F11.5)
80    FORMAT(F7.1)
90    FORMAT(F5.3)
120   FORMAT(F11.6)
      END

```

```

C      ORDENAMIENTO DE LAS MATRICES DE MASAS Y DE RIGIDECEES
      SUBROUTINE PRO4(W,H,R,AMA,RI,N)
      DIMENSION W(N,N),H(N),R(N,N),RI(N,N),AMA(N,N)
      DO 120 I=1,N
      DO 120 J=1,N
      AMA(I,J)=W(I,J)/981.0
120    CONTINUE
      DO 130 I=1,N
      DO 130 J=1,N
      W(I,J)=AMA(I,J)
130    CONTINUE
      DO 150 I=1,N
      DO 150 J=1,N
      RI(I,J)=0.0
150    CONTINUE
      RI(1,1)=R(1,1)+R(2,2)
      RI(1,2)=-R(2,2)
      DO 200 I=2,N
      IF(I.NE.N)GOTO 180
      RI(N,N)=R(N,N)
      RI(N,N-1)=-R(N,N)
      GOTO 200
180    RI(I,I)=R(I,I)+R(I+1,I+1)
      RI(I,I-1)=-R(I,I)
      RI(I,I+1)=-R(I+1,I+1)
200    CONTINUE
      DO 230 I=1,N
      DO 230 J=1,N
      R(I,J)=0.0
230    CONTINUE
      DO 250 I=1,N
      DO 250 J=1,N
      R(I,J)=RI(I,J)
250    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

C      DETERMINACION DE LAS FRECUENCIAS Y MODOS DE VIBRAR
C      METODO DE JACOBI
      SUBROUTINE PRO5(A,B,X,EIGV,D,N)
      DIMENSION A(N,N),B(N,N),X(N,N),EIGV(N),D(N)
      NSMAX=15
      DO 280 I=1,N
      IF(A(I,I).GT.0..AND.B(I,I).GT.0.)GOTO 260
      WRITE(*,250)
250    FORMAT(1X,'MATRICES NO POSITIVAS DEFINIDAS')
      GOTO 3000
260    D(I)=A(I,I)/B(I,I)
      EIGV(I)=D(I)
280    CONTINUE
      DO 340 I=1,N
      DO 320 J=1,N
      X(I,J)=0.
320    CONTINUE
      X(I,I)=1.
340    CONTINUE
      IF(N.NE.1)GOTO 380
      GOTO 1620
380    CONTINUE
C      INICIALIZACION DE LAS ITERACIONES Y DE SU CONTADOR
      NSWEEP=0
      NR=N-1
410    CONTINUE
      NSWEEP=NSWEEP+1
      EPS=(.01**NSWEEP)**2
      DO 1190 J=1,NR
      JJ=J+1
      DO 1180 K=JJ,N
      EPTOLA=(A(J,K)*A(J,K))/(A(J,J)*A(K,K))
      EPTOLB=(B(J,K)*B(J,K))/(B(J,J)*B(K,K))
      IF(EPTOLA.LT.EPS.AND.EPTOLB.LT.EPS)GOTO 1180
      AKK=A(K,K)*B(J,K)-B(K,K)*A(J,K)
      AJJ=A(J,J)*B(J,K)-B(J,J)*A(J,K)
      AB=A(J,J)*B(K,K)-A(K,K)*B(J,J)
      CHECK=(AB*AB+4.*AKK*AJJ)/4.
      IF(CHECK.GE.0.)GOTO 550
      WRITE(*,250)
      GOTO 3000
550    CONTINUE
      SQCH=SQRT(CHECK)
      D1=AB/2+SQCH
      D2=AB/2-SQCH
      DEN=D1
      IF(ABS(D2).LE.ABS(D1))GOTO 600
      DEN=D2
600    CONTINUE
      IF(DEN.EQ.0)GOTO 610
      GOTO 640
610    CONTINUE
      CA=0.
      CG=-A(J,K)/A(K,K)
      GOTO 660

```

```

640  CONTINUE
      CA=AKK/DEN
      CG=-AJJ/DEN
660  CONTINUE
      IF((N-2).EQ.0)GOTO 1040
      JP1=J+1
      JM1=J-1
      KP1=K+1
      KM1=K-1
      IF((JM1-1).LT.0)GOTO 820
      DO 810 I=1,JM1
      AJ=A(I,J)
      BJ=B(I,J)
      AK=A(I,K)
      BK=B(I,K)
      A(I,J)=AJ+CG*AK
      B(I,J)=BJ+CG*BK
      A(I,K)=AK+CA*AJ
      B(I,K)=BK+CA*BJ
810  CONTINUE
820  CONTINUE
      IF((KP1-N).GT.0)GOTO 930
      DO 920 I=KP1,N
      AJ=A(J,I)
      BJ=B(J,I)
      AK=A(K,I)
      BK=B(K,I)
      A(J,I)=AJ+CG*AK
      B(J,I)=BJ+CG*BK
      A(K,I)=AK+CA*AJ
      B(K,I)=BK+CA*BJ
920  CONTINUE
930  CONTINUE
      IF((JP1-KM1).GT.0)GOTO 1040
      DO 1030 I=JP1,KM1
      AJ=A(J,I)
      BJ=B(J,I)
      AK=A(I,K)
      BK=B(I,K)
      A(J,I)=AJ+CG*AK
      B(J,I)=BJ+CG*BK
      A(I,K)=AK+CA*AJ
      B(I,K)=BK+CA*BJ
1030 CONTINUE
1040 CONTINUE
      AK=A(K,K)
      BK=B(K,K)
      A(K,K)=AK+2*CA*A(J,K)+CA*CA*A(J,J)
      B(K,K)=BK+2*CA*B(J,K)+CA*CA*B(J,J)
      A(J,J)=A(J,J)+2*CG*A(J,K)+CG*CG*AK
      B(J,J)=B(J,J)+2*CG*B(J,K)+CG*CG*BK
      A(J,K)=0.0
      B(J,K)=0.0
      DO 1170 I=1,N
      XJ=X(I,J)

```

```

      XK=X(I,K)
      X(I,J)=XJ+CG*XK
      X(I,K)=XK+CA*XJ
1170  CONTINUE
1180  CONTINUE
1190  CONTINUE
      DO 1240 I=1,N
      IF(A(I,I).GT.0..AND.B(I,I).GT.0.)GOTO 1230
      WRITE(*,250)
      GOTO 3000
1230  CONTINUE
      EIGV(I)=A(I,I)/B(I,I)
1240  CONTINUE
C     REVISION DE LA CONVERGENCIA
      RTOL=1E-12
      DO 1310 I=1,N
      TOL=RTOL*D(I)
      DIF=ABS(EIGV(I)-D(I))
      IF(DIF.GT.TOL)GOTO 1570
1310  CONTINUE
C     REVISION DE TODOS LOS ELEMENTOS FUERA DE LA DIAGONAL
C     PARA VER SI SE REQUIERE OTRA ITERACION
      EPS=RTOL**2
      DO 1430 J=1,NR
      JJ=J+1
      DO 1430 K=JJ,N
      EPSA=(A(J,K)*A(J,K))/(A(J,J)*A(K,K))
      EPSB=(B(J,K)*B(J,K))/(B(J,J)*B(K,K))
      IF(EPSA.LT.EPS.AND.EPSB.LT.EPS)GOTO 1430
      GOTO 1570
1430  CONTINUE
1440  CONTINUE
      DO 1480 I=1,N
      DO 1480 J=1,N
      A(J,I)=A(I,J)
      B(J,I)=B(I,J)
1480  CONTINUE
      DO 1550 J=1,N
      BB=SQRT(B(J,J))
      DO 1550 K=1,N
      X(K,J)=X(K,J)/BB
1550  CONTINUE
      GOTO 1620
1570  CONTINUE
      DO 1590 I=1,N
      D(I)=EIGV(I)
1590  CONTINUE
      IF(NSWEEP.LT.NSMAX)GOTO 410
      GOTO 1440
1620  CONTINUE
3000  CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

C      PROGRAMA QUE ORDENA EL VECTOR DE FRECUENCIAS Y
C      LA MATRIZ DE MODOS DE VIBRAR
      SUBROUTINE PRO6(EIGV,X,N,NAM,DRI)
      CHARACTER NEM*7,NIM*7,NAM*4,DRI*1
      DIMENSION EIGV(N),X(N,N)
      J=0.
10     CONTINUE
      DO 30 I=2,N-J
      IF(EIGV(I-1).LE.EIGV(I))GOTO 30
      Z=EIGV(I-1)
      EIGV(I-1)=EIGV(I)
      EIGV(I)=Z
      DO 20 K=1,N
      PAP=X(K,I-1)
      X(K,I-1)=X(K,I)
      X(K,I)=PAP
20     CONTINUE
30     CONTINUE
      J=J+1
      IF((N-J).LT.2)GOTO 40
      GOTO 10
40     CONTINUE
      NEM(1:1)=DRI
      NEM(2:1+1)=CHAR(58)
      NEM(3:2+4)=NAM
      NEM(7:6+1)=CHAR(50)
      OPEN(3,FILE=NEM,STATUS='NEW')
      DO 50 I=1,N
      WRITE(3,70)EIGV(I)
50     CONTINUE
      DO 60 I=1,N
      DO 60 J=1,N
      WRITE(3,70)X(I,J)
60     CONTINUE
70     FORMAT(F12.6)
      CLOSE(3)
      NIM(1:1)=DRI
      NIM(2:1+1)=CHAR(58)
      NIM(3:2+4)=NAM
      NIM(7:6+1)=CHAR(52)
      OPEN(4,FILE=NIM,STATUS='NEW')
      WRITE(4,100)
      WRITE(4,*)
      DO 80 I=1,N
      WRITE(4,110)I,EIGV(I)
80     CONTINUE
      WRITE(4,*)
      WRITE(4,*)
      WRITE(4,120)
      WRITE(4,*)
      DO 90 I=1,N
      DO 90 J=1,N
      WRITE(4,130)I,J,X(I,J)
90     CONTINUE
100    FORMAT(3X,' Vector de Frecuencias de Vibrar al cuadrado ')

```

```
110  FORMAT(I3,F12.6)
120  FORMAT(3X,' Matriz de Formas Modales ')
130  FORMAT(3X,' R(',I3,',',I3,')= ',F12.6)
      CLOSE(4)
      RETURN
      END
```

```

C   FORMACION DE LAS MATRICES DE MASAS, AMORTIGUACION Y RIGIDECES
C   DESACOPLADAS
SUBROUTINE PRO7(GAMA,AMA,R,E,FM,TX,B1,B2,W1,C1,R1,N,NEM,DRI)
CHARACTER NEM*4,NAM*7,DRI*1
DIMENSION AMA(N,N),R(N,N),E(N),FM(N,N),TX(N,N)
DIMENSION W1(N),C1(N),R1(N),B1(N,N),B2(N,N)
EXTERNAL TRANMA,MULMAT
DO 10 I=1,N
DO 10 J=1,N
B1(I,J)=0.
B2(I,J)=0.
10  CONTINUE
CALL TRANMA(FM,N,N,TX)
CALL MULMAT(TX,AMA,B1,N,N,N,N)
CALL MULMAT(B1,FM,B2,N,N,N,N)
DO 30 I=1,N
W1(I)=B2(I,I)
30  CONTINUE
DO 40 I=1,N
DO 40 J=1,N
B1(I,J)=0.
B2(I,J)=0.
40  CONTINUE
CALL MULMAT(TX,R,B1,N,N,N,N)
CALL MULMAT(B1,FM,B2,N,N,N,N)
DO 50 I=1,N
R1(I)=B2(I,I)
50  CONTINUE
DO 60 I=1,N
ALFA=SQRT(E(I))*GAMA
BETA=GAMA/SQRT(E(I))
C1(I)=ALFA*W1(I)+BETA*R1(I)
60  CONTINUE
NAM(1:1)=DRI
NAM(2:1+1)=CHAR(58)
NAM(3:2+4)=NEM
NAM(7:6+1)=CHAR(53)
OPEN(5,FILE=NAM,STATUS='NEW')
DO 70 I=1,N
WRITE(5,80)W1(I)
WRITE(5,80)C1(I)
WRITE(5,80)R1(I)
70  CONTINUE
80  FORMAT(F12.6)
CLOSE(5)
RETURN
END

```

```

C      SOLUCION DE LA ECUACION DE MOVIMIENTO
C      METODO BETA DE NEWMARK
SUBROUTINE PROB(DT,A,S,V,U,N,N1,NAM,NOM,DRI)
DIMENSION A(N1),S(N1),V(N1),U(N1)
CHARACTER NAM*4,NOM*4,NEM*7,NIM*7,DRI*1
NIM(1:1)=DRI
NIM(2:1+1)=CHAR(58)
NIM(3:2+4)=NAM
NIM(7:6+1)=CHAR(53)
OPEN(5,FILE=NIM,STATUS='OLD')
NEM(1:1)=DRI
NEM(2:1+1)=CHAR(58)
NEM(3:2+4)=NOM
NEM(7:6+1)=CHAR(49)
OPEN(6,FILE=NEM,STATUS='NEW')
DO 30 J=1,N
DO 10 L=1,N1
U(L)=0.0
V(L)=0.0
S(L)=0.0
10    CONTINUE
WRITE(6,50)S(1),V(1),U(1)
READ(5,100)AM
READ(5,100)C
READ(5,100)R
DO 20 I=1,N1-1
GA=0.50
BE=0.25
C      CALCULO DE DESPLAZAMIENTOS, VELOCIDADES Y ACELERACIONES
15    CONTINUE
A1=V(I)+(1.0-GA)*DT*U(I)
B=S(I)+DT*V(I)+(0.5-BE)*(DT**2)*U(I)
BM=AM+C*GA*DT+R*BE*DT**2
FE=-AM*A(I+1)-C*A1-R*B
APO=FE/BM
RES=APO-U(I)
RES=ABS(RES)
IF(RES.LE.0.0001)GOTO 17
U(I)=APO
GOTO 15
17    CONTINUE
U(I+1)=APO
V(I+1)=A1+GA*DT*U(I+1)
S(I+1)=B+BE*DT**2*U(I+1)
SS=S(I+1)
VV=V(I+1)
UU=U(I+1)
WRITE(6,50)SS,VV,UU
20    CONTINUE
30    CONTINUE
CLOSE(6)
CLOSE(5)
50    FORMAT(3F15.10)
100   FORMAT(F12.6)
RETURN

```

END

```

C      PROGRAMA QUE OBTIENE LOS VALORES DE DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y
C      ACELERACION ACOPLADOS
      SUBROUTINE PROOB(AM, FORMOD, C, DES, VELO, ACE, F, G, H, N, N1, NAM, DRI)
      EXTERNAL MULMAT
      CHARACTER NAM*4, NEM*7, NUM*7, DRI*1
      DIMENSION DES(N, N1), VELO(N, N1), ACE(N, N1), FORMOD(N, N), C(N, N1)
      DIMENSION AM(N, N), F(N), G(N), H(N)
      NEM(1:1)=DRI
      NEM(2:1+1)=CHAR(58)
      NEM(3:2+4)=NAM
      NEM(7:6+1)=CHAR(49)
      OPEN(6, FILE=NEM, STATUS='OLD')
      DO 10 I=1, N
      DO 10 J=1, N1
      READ(6, 20) DES(I, J), VELO(I, J), ACE(I, J)
10     CONTINUE
20     FORMAT(3F15.10)
      CLOSE(6)
      NEM(1:1)=DRI
      NEM(2:1+1)=CHAR(58)
      NEM(3:2+4)=NAM
      NEM(7:6+1)=CHAR(50)
      OPEN(7, FILE=NEM, STATUS='NEW')
      DO 15 I=1, N
      DO 15 J=1, N1
      C(I, J)=0.0
15     CONTINUE
      CALL MULMAT(FORMOD, DES, C, N, N, N, N1)
      DO 40 I=1, N
      F(I)=0.
      DO 36 J=1, N1
      WRITE(7, 100)C(I, J)
      F(I)=F(I)+C(I, J)**2
36     CONTINUE
      F(I)=SQRT(F(I))
40     CONTINUE
      DO 45 I=1, N
      DO 45 J=1, N1
      C(I, J)=0.0
45     CONTINUE
      CALL MULMAT(FORMOD, VELO, C, N, N, N, N1)
      DO 60 I=1, N
      G(I)=0.
      DO 55 J=1, N1
      WRITE(7, 100)C(I, J)
      G(I)=G(I)+C(I, J)**2
55     CONTINUE
      G(I)=SQRT(G(I))
60     CONTINUE
      DO 65 I=1, N
      DO 65 J=1, N1
      C(I, J)=0.0
65     CONTINUE
      CALL MULMAT(FORMOD, ACE, C, N, N, N, N1)
      DO 80 I=1, N

```

```

H(I)=0.
DO 70 J=1,N1
WRITE (7,100)C(I,J)
H(I)=H(I)+C(I,J)**2
70 CONTINUE
H(I)=SQRT(H(I))
80 CONTINUE
100 FORMAT(1PE11.4)
CLOSE(7)
WRITE(*,300)
300 FORMAT(3X,'NIVEL',5X,'DESPLAZAMIENTO',5X,'VELOCIDAD',5X,'ACELERACI
*ON')
WRITE(*,350)
350 FORMAT(3X,' ',5X,' (cm) ',5X,' (cm/s) ',5X,' (cm/s^
*2)')
WRITE(*,400)
400 FORMAT(3X,' ')
NUM(1:1)=DRI
NUM(2:1+1)=CHAR(58)
NUM(3:2+4)=NAM
NUM(7:6+1)=CHAR(51)
OPEN(8,FILE=NUM,STATUS='NEW')
WRITE(8,300)
WRITE(8,350)
WRITE(8,*)
DO 500 I=1,N
WRITE(*,600)I,F(I),G(I),H(I)
WRITE(8,600)I,F(I),G(I),H(I)
500 CONTINUE
600 FORMAT(I3,9X,1PE11.4,7X,1PE11.4,5X,1PE11.4)
CLOSE(8)
RETURN
END

```

```
C   PROGRAMA DE MULTIPLICACION DE MATRICES
C   SUBROUTINA MULMAT
      SUBROUTINE MULMAT(A,B,C,N1,N2,M1,M2)
      DIMENSION A(N1,N2),B(M1,M2),C(N1,M2)
      DO 300 K=1,N1
      DO 200 I=1,M2
      C(K,I)=0.0
      DO 100 J=1,N2
      C(K,I)=C(K,I)+A(K,J)*B(J,I)
100  CONTINUE
200  CONTINUE
300  CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
C   OBTENCION DE LA TRANSPUESTA DE UNA MATRIZ
C   TRANMA
    SUBROUTINE TRANMA(X,N1,N2,XT)
    DIMENSION X(N1,N2),XT(N2,N1)
    DO 90 I=1,N1
    DO 80 J=1,N2
    XT(J,I)=X(I,J)
80  CONTINUE
90  CONTINUE
    RETURN
    END
```

```

INTERFACE TO SUBROUTINE TIME(N,STR)
CHARACTER*10 STR [NEAR,REFERENCE]
INTEGER*2 N [VALUE]
END
C METODO GENERALIZADO DE NEWMARK
C GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA
EXTERNAL PRO4,PRO5,PRO6,SUB1,TGCSIM,SUB2
CHARACTER*1 DRI
CHARACTER*4 NAM,NEM,NIM
CHARACTER*6 CORA
CHARACTER*7 CHAPA,NOM
CHARACTER*10 TSTR
DIMENSION A(30000)
WRITE(*,4)
4 FORMAT(3X,/, ' En que DRIVE se encuentra la INFORMACION (A, B)')
READ(*,6)DRI
6 FORMAT(A1)
WRITE(*,5)
5 FORMAT(3X,/, ' Nombre del ARCHIVO de DATOS GENERALES (4 caracteres)
* ')
READ(*,7)NAM
7 FORMAT(A4)
WRITE(*,9)
9 FORMAT(3X,/, ' Nombre del ARCHIVO del ACELEROGRAMA (4 caracteres)')
READ(*,7)NEM
WRITE(*,11)
11 FORMAT(3X,/, ' Nombre del ARCHIVO de RESULTADOS (4 caracteres) ')
READ(*,7)NIM
CHAPA(1:1)=DRI
CHAPA(2:1+1)=CHAR(58)
CHAPA(3:2+4)=NAM
CHAPA(7:6+1)=CHAR(49)
OPEN(1,FILE=CHAPA,STATUS='OLD')
READ(1,13)A(1)
13 FORMAT(F7.3)
N=INT(A(1))
NDE=N
READ(1,14)GAMA
14 FORMAT(F6.4)
N1=2
N2=N1+N*N
N3=N2+N
N4=N3+N*N
N5=N4+N*N
N6=N5+N*N
N7=N6+N*N
N8=N7+N
N9=N8+N
N10=N9+N*N
J=2
DO 17 I=1,N
READ(1,19)A(J)
IF(I.EQ.N)GOTO 15
J=J+N+1
GOTO 17

```

```

15     J=J+1
17     CONTINUE
19     FORMAT(F11.5)
      DO 21 I=1,N
      READ(1,19)A(J)
      J=J+1
21     CONTINUE
      DO 23 I=1,N
      READ(1,19)A(J)
      IF(I.EQ.N)GOTO 22
      J=J+N+1
      GOTO 23
22     J=J+1
23     CONTINUE
      CLOSE(1)
      CORA(1:1)=DRI
      CORA(2:1+1)=CHAR(58)
      CORA(3:2+4)=NEM
      OPEN(2,FILE=CORA,STATUS='OLD')
      READ(2,80)AAA
      N1=INT(AAA)
      NDA=N1
      READ(2,90)DT
      N11=N10+N1
      N12=N11+N
      N13=N12+N
      DO 33 I=N10,N11-1
      READ(2,120)A(I)
      A(I)=100*A(I)
33     CONTINUE
      CLOSE(2)
80     FORMAT(F7.1)
90     FORMAT(F5.3)
120    FORMAT(F11.6)
      N14=N13+N
      N15=N14+N
      N16=N15+N
      N17=N16+N
      N18=N17+N
      N19=N18+N
      N20=N19+N
      N21=N20+N*N1
      N22=N21+N*N1
      N23=N22+N*N1
      N24=N23+N
      N25=N24+N
      N26=N25+N
      N27=N26+N
      N28=N27+6
      CALL PR04(A(2),A(N2),A(N3),A(N4),A(N5),NDE)
      WRITE(*,1000)
1000  FORMAT(3X,' Inicio del Calculo de las FORMAS MODALES ')
      CALL TIME(10,TSTR)
      WRITE(*,*)TSTR
      CALL PR05(A(N5),A(N4),A(N6),A(N7),A(N8),NDE)

```

```

WRITE(*,1010)
1010 FORMAT(3X,' Fin del Calculo de las FORMAS MODALES ')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CALL PR06(A(N7),A(N6),NDE,NAM,DRI)
WRITE(*,1020)
1020 FORMAT(3X,' Inicio de la Formacion de la MATRIZ K')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CALL SUB1(GAMA,A(2),A(N3),A(N7),DT,A(N9),A(N27),NDE)
WRITE(*,1030)
1030 FORMAT(3X,' Fin de la Formacion de la MATRIZ K')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
WRITE(*,1040)
1040 FORMAT(3X,' Inicio de la TRIANGULACION')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CALL TGCSIM(A(N9),NDE)
WRITE(*,1050)
1050 FORMAT(3X,' Fin de la TRIANGULACION')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
NOM(1:1)=DRI
NOM(2:1+1)=CHAR(58)
NOM(3:2+4)=NAM
NOM(7:6+1)=CHAR(53)
OPEN(5,FILE=NOM,STATUS='NEW')
DO 1053 I=N9,N10-1
WRITE(5,1055)A(I)
1053 CONTINUE
1055 FORMAT(F15.8)
CLOSE(5)
WRITE(*,1060)
1060 FORMAT(3X,' Inicio de la Solucion del SISTEMA')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
CALL SUB2(A(N11),A(N12),A(N13),A(N14),A(N15),DT,A(N27),A(N16),A(N1
*7),A(N18),A(N3),A(2),A(N19),A(N10),A(N9),A(N20),A(N21),A(N22),A(N2
*3),A(N24),A(N25),NDE,NDA,NIM,DRI)
WRITE(*,1070)
1070 FORMAT(3X,' Fin de la Solucion del SISTEMA')
CALL TIME(10,TSTR)
WRITE(*,*)TSTR
END

```

```
C  PROGRAMA PARA LA FORMACION DE LA MATRIZ K
  SUBROUTINE SUB1(GAMA,AM,R,E,DT,AK,VEDA,N)
  DIMENSION E(N),AM(N,N),R(N,N),AK(N,N),VEDA(6)
  EE=E(1)
  Z=0.5
  B9=0.25
  ALFA=GAMA*SQRT(EE)
  UN=GAMA/SQRT(EE)
  E0=Z*DT
  DT2=DT*DT
  E1=B9*DT2
  EK1=1.0+E0*ALFA
  EK2=E0*UN+E1
  EA1=DT-E0
  EB1=(0.5-B9)*DT2
  VEDA(1)=E0
  VEDA(2)=E1
  VEDA(3)=EA1
  VEDA(4)=EB1
  VEDA(5)=UN
  VEDA(6)=ALFA
  DO 130 I=1,N
  DO 130 J=1,N
  AK(I,J)=EK1*AM(I,J)+EK2*R(I,J)
130 CONTINUE
  RETURN
  END
```

```

C      PROGRAMA PARA RESOLVER LAS ECUACIONES
C      GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA
      SUBROUTINE SUB2(A,B,S,V,U,DT,VEDA,VA,VB,VC,R,AM,R1,AT,AK,X,Y,Z,X1,
*Y1,Z1,N,N1,NAM,DRI)
      EXTERNAL MULMAT,SGCSIM
      CHARACTER DRI*1,NAM*4,NEM*7,NIM*7
      DIMENSION A(N),B(N),S(N),V(N),U(N),VA(N),VB(N),VC(N),R(N,N)
      DIMENSION AM(N,N),R1(N),AT(N1),AK(N,N),X(N,N1),Y(N,N1),Z(N,N1)
      DIMENSION X1(N),Y1(N),Z1(N),VEDA(6)
      E0=VEDA(1)
      E1=VEDA(2)
      EA1=VEDA(3)
      EB1=VEDA(4)
      UN=VEDA(5)
      ALFA=VEDA(6)
      DO 200 I=1,N
      A(I)=0.0
      B(I)=0.0
200    CONTINUE
      NIM(1:1)=DRI
      NIM(2:1+1)=CHAR(58)
      NIM(3:2+4)=NAM
      NIM(7:6+1)=CHAR(50)
      OPEN(7,FILE=NIM,STATUS='NEW')
      DO 300 K=1,N1
      DO 240 I=1,N
      A(I)=V(I)+EA1*U(I)
      B(I)=S(I)+DT*V(I)+EB1*U(I)
240    CONTINUE
      DO 250 J=1,N
      VA(J)=UN*A(J)+B(J)
250    CONTINUE
      CALL MULMAT(R,VA,VB,N,N,N,1)
      CALL MULMAT(AM,A,VC,N,N,N,1)
      DO 260 I=1,N
      R1(I)=-AT(K)*AM(I,I)-ALFA*VC(I)-VB(I)
      WRITE(*,261)I,R1(I)
260    CONTINUE
261    FORMAT(3X,' R1(',I3,')= ',F20.8)
      CALL SGCSIM(AK,R1,N)
      DO 265 I=1,N
      U(I)=R1(I)
265    CONTINUE
      DO 270 J=1,N
      V(J)=A(J)+E0*U(J)
      S(J)=B(J)+E1*U(J)
270    CONTINUE
      DO 280 I=1,N
      X(I,K)=S(I)
      Y(I,K)=V(I)
      Z(I,K)=U(I)
      WRITE(7,310)X(I,K),Y(I,K),Z(I,K)
280    CONTINUE
300    CONTINUE
310    FORMAT(5X,F15.6,5X,F15.6,5X,F15.6)

```

```

CLOSE (7)
DO 370 I=1,N
X1(I)=0.
Y1(I)=0.
Z1(I)=0.
DO 360 J=1,N1
X1(I)=X1(I)+X(I,J)**2
Y1(I)=Y1(I)+Y(I,J)**2
Z1(I)=Z1(I)+Z(I,J)**2
360 CONTINUE
X1(I)=SQRT(X1(I))
Y1(I)=SQRT(Y1(I))
Z1(I)=SQRT(Z1(I))
370 CONTINUE
WRITE(*,380)
380 FORMAT(3X,'NIVEL',5X,'DESPLAZAMIENTO',5X,'VELOCIDAD',5X,'ACELERACI
*ON')
WRITE(*,390)
390 FORMAT(3X,' ',5X,' (cm) ',5X,' (cm/s) ',5X,' (cm/s^2)
*')
WRITE(*,*)
DO 400 I=1,N
WRITE(*,740) I,X1(I),Y1(I),Z1(I)
400 CONTINUE
NEM(1:1)=DRI
NEM(2:1+1)=CHAR(58)
NEM(3:2+4)=NAM
NEM(7:6+1)=CHAR(49)
OPEN(6,FILE=NEM,STATUS='NEW')
DO 600 I=1,N
WRITE(6,740) I,X1(I),Y1(I),Z1(I)
600 CONTINUE
CLOSE(6)
NIM(1:1)=DRI
NIM(2:1+1)=CHAR(58)
NIM(3:2+4)=NAM
NIM(7:6+1)=CHAR(51)
OPEN(8,FILE=NIM,STATUS='NEW')
WRITE(8,380)
WRITE(8,390)
WRITE(8,*)
DO 730 I=1,N
WRITE(8,740) I,X1(I),Y1(I),Z1(I)
730 CONTINUE
740 FORMAT(I3,9X,1PE11.4,7X,1PE11.4,5X,1PE11.4)
CLOSE(8)
RETURN
END

```

```

C   PROGRAMA QUE TRIANGULA UNA MATRIZ CUADRADA
C   METODO DE GAUSS-CROUT
SUBROUTINE TGCSIM(A,N)
DIMENSION A(N,N)
A(1,2)=A(1,2)/A(1,1)
A(2,2)=A(2,2)-A(1,1)*A(1,2)**2
IF(N.EQ.2) GOTO 50
DO 40 J=3,N
  IS=J-1
  A(1,J)=A(1,J)/A(1,1)
  DO 20 I=2,IS
    S=0
    KS=I-1
    DO 10 K=1,KS
      S=S+A(K,I)*A(K,K)*A(K,J)
10   CONTINUE
    A(I,J)=(A(I,J)-S)/A(I,I)
20   CONTINUE
    S1=0
    DO 30 K=1,IS
      S1=S1+A(K,K)*A(K,J)**2
30   CONTINUE
    A(J,J)=A(J,J)-S1
40   CONTINUE
50   CONTINUE
RETURN
END

```

```

C   PROGRAMA QUE HACE LAS SUSTITUCIONES PARA EL
C   METODO DE GAUSS-CROUT
SUBROUTINE SGCSIM(A,B,N)
DIMENSION A(N,N),B(N)
DO 20 I=2,N
  KS=I-1
  S=0
  DO 10 K=1,KS
    S=S+A(K,I)*B(K)
10  CONTINUE
    B(I)=B(I)-S
20  CONTINUE
    B(N)=B(N)/A(N,N)
    IS=N-1
    DO 40 I=1,IS
      IA=N-I
      KI=IA+1
      S=0
      DO 30 K=KI,N
        S=S+A(IA,K)*B(K)
30  CONTINUE
        B(IA)=B(IA)/A(IA,IA)-S
40  CONTINUE
    RETURN
END

```

## 5.- EJEMPLO

En este capítulo se presentan 3 ejemplos de aplicación de los Métodos de Superposición Modal y Generalizado de Newmark que se presentaron en los capítulos 2 y 3 de este trabajo.

### 5.1 EJEMPLO 1

Este ejemplo tiene como finalidad únicamente indicarle al lector la manera en que se llenan las formas propuestas en este trabajo y que servirán de ayuda para evitar errores. Para ello se utiliza la estructura que se indica en la fig. 5.1. Es una estructura de 3 niveles cuyos datos se muestran en la misma figura. En la tabla 5.1 se vacía toda esta información como se indica claramente en ella.

Los datos del movimiento del terreno se muestran en la

tabla 5.2. Como se supone que los 10 datos están normalizados se utiliza la tabla correspondiente a un acelerograma normalizado. En esta tabla se indica el intervalo de tiempo en el que se evaluarían las ecuaciones de movimiento, el tiempo que se considera como inicial para que a partir de éste se generen los otros y las aceleraciones correspondientes a cada punto.

## 5.2 EJEMPLO 2

La estructura que se analiza en este segundo ejemplo se muestra en la fig. 5.2. Esta estructura tiene 3 grados de libertad y los valores de los pesos de los niveles y las rigideces de entrepiso se muestran en la misma figura, así como las alturas correspondientes.

Para este ejemplo se considera un valor de 10 % para  $\zeta$  (Porcentaje de Amortiguamiento Crítico). Inicialmente se obtuvo el valor del período fundamental de la estructura. Este valor fue de 0.075 seg, el cual sirve como base para determinar el tamaño de paso para integrar las ecuaciones de movimiento.

Para analizar la estructura se escogió un acelerograma real proporcionado por el CIRES (Centro de Instrumentación y Registro Sísmico A. C.). El movimiento del terreno ocurrió el día 25 de abril de 1990 y tuvo una duración de aproximadamente 110 seg. El intervalo de tiempo de este acelerograma es 0.01 seg. La dirección del movimiento elegido

fue la Norte-Sur. Con esta base y sabiendo el período fundamental de la estructura se eligieron dos tamaños de paso: el primero de 0.01 seg y el segundo de 0.02 seg para ambos métodos de análisis. El intervalo de tiempo del acelerograma que se utilizó para este problema fue de 10 seg (entre 50 seg y 60 seg ).

### 5.3 EJEMPLO 3

En este último ejemplo que se presenta se utiliza una estructura de 15 niveles como se muestra en la figura 5.3. En la tabla 5.3 se encuentran los valores de los pesos, alturas y rigideces correspondientes. También para este caso se utiliza un valor de  $\zeta = 10\%$ . Se obtuvo con anterioridad el período fundamental de la estructura que fue de 2.02 seg. Con el conocimiento de T se optó por utilizar el mismo acelerograma del día 25 de Abril, considerando sólo 10 segundos del movimiento (entre 50 y 60 seg.), con un intervalo de tiempo de 0.5 seg y en la misma dirección Norte-Sur.

Los resultados que se obtuvieron al hacer el análisis de los dos ejemplos anteriores se muestran en las tablas 5.4 para el ejemplo 2 y 5.5 para el ejemplo 3.

## 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES:

Las conclusiones que se obtuvieron a través de la elaboración de este trabajo son las siguientes:

- 1) El utilizar el Método de Superposición Modal (MSPM) en vez del Método Generalizado de Newmark (MGN) implica un aumento en el tiempo de proceso de la información ya que, como se vió anteriormente, en el MSPM se desacoplan las ecuaciones y en el MGN el sistema de ecuaciones que se forma se resuelve directamente.
- 2) Es necesario conocer el período fundamental de la estructura para que se escoja el tamaño de paso a utilizar. En los ejemplos propuestos se utilizó el Método de Jacobi

para obtener las formas modales de la estructura.

3) Se hace notar que el MSPM es un método para sistemas lineales únicamente. La solución para este tipo de modelación es mediante un proceso paso a paso en donde se supone una variación lineal de la aceleración. Entonces, para este tipo de sistemas se puede considerar que el MSPM es exacto.

4) Los tiempos utilizados por cada uno de los ejemplos se muestran en la tabla 6.1. En esta tabla se observa que el método que invierte menos tiempo de procesamiento es el Método Generalizado de Newmark. La variación en los tiempos de operación es muy grande.

5) La memoria utilizada por cada método y por los acelerogramas se muestra en la tabla 6.2. También aquí se nota que entre mas valores tenga el acelerograma mas bytes se utilizarán al emplear el MSPM.

6) La memoria utilizada por cada uno de los programas de cálculo es del orden de los 200 mil bytes y los del preprocesador del orden de los 50 mil bytes. En total 500 mil bytes aproximadamente.

7) Los resultados que se presentan son los valores obtenidos según la expresión  $R = [ \sum R_i^2 ]^{1/2}$  que propone el RCDF.

## 6.2 RECOMENDACIONES:

1) Se recomienda utilizar un procesador mas potente (por ejemplo un procesador 80286) para el uso del programa en la

computadora para disminuir los tiempos en los cálculos, sobre todo en el MSPM. También es recomendable utilizar un coprocesador matemático para agilizar las operaciones.

2) Se recomienda también que la computadora tenga disco duro para guardar toda la información que se genera, ya que como se dijo anteriormente y observando la tabla 6.2 se puede notar que es una gran cantidad de bytes los que se manejan.

3) La modelación que se utilizó en este trabajo fue a través de la idealización masa-resorte unidimensional. Se recomienda obtener una matriz de masas que contemple la posición de cada una de ellas en función de las otras. Por ejemplo, utilizar un modelo tridimensional.

4) También será conveniente que se utilice otra modelación masa-resorte para obtener la matriz de rigideces para hacer que la solución de la ecuación de movimiento se acerque mas a la realidad. Por ejemplo utilizar la matriz de la barra que se propone en el Método de Rigideces.

5) La solución del sistema de ecuaciones algebraicas que se forma en el MGN se hace mediante el Método de Gauss-Crout para matrices simétricas. Se recomienda utilizar un método mas eficiente que reduzca el tiempo de proceso, por ejemplo un método unidimensional

**APENDICES**

## APENDICE A

### VIBRACIONES LIBRES DE SISTEMAS LINEALES DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD. -

Para el caso de vibraciones libres de un sistema la ecuación de movimiento:

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \dot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = \underline{F}_E \quad (\text{A } 1)$$

queda de la siguiente forma:

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = 0 \quad (\text{A } 2)$$

dado que  $\underline{F}_E = 0$ .

Se dice que una estructura vibra en uno de sus modos naturales cuando sus desplazamientos libres pueden ponerse en la forma:

$$\underline{u}(t) = \underline{z}_n \theta_n(t) \quad (A 3)$$

en la que el subíndice  $n$  denota el orden del modo,  $\underline{z}_n$  es la forma del modo, la cual no varía con el tiempo, y  $\theta$  es una función escalar. En otras palabras, el sistema vibra en uno de sus modos naturales si la base permanece inmóvil, todas las masas del sistema describen un movimiento sincrónico y la forma de la configuración no depende del tiempo, aunque su magnitud varía con  $t$ , como lo prescribe la  $n$ -ésima función  $\theta$ .

Si sustituimos la expresión A 3 en A 2 se tiene:

$$\underline{M} \underline{\ddot{z}}_n \theta_n + \underline{K} \underline{z}_n \theta_n = 0 \quad (A 4)$$

que puede separarse en:

$$\ddot{\theta}_n + \omega_n^2 \theta_n = 0 \quad (A 5)$$

y

$$\left( \underline{K} - \omega_n^2 \underline{M} \right) \underline{z}_n = 0 \quad (A 6)$$

donde  $\omega_n$  es una constante para el sistema y es independiente del tiempo.

Se puede escribir la solución general de la ecuación A 5 como:

$$\theta_n = \text{sen } \omega_n (t - t_n) \quad (\text{A } 7)$$

en que se ha suprimido un multiplicador arbitrario, porque  $\theta_n$  estará multiplicado por el conjunto de amplitudes  $z_n$ , que contiene justamente dichos factores arbitrarios. Como la amplitud de  $\theta_n$  es igual a uno, el de la  $r$ -ésima coordenada en el  $n$ -ésimo modo es igual al valor del  $r$ -ésimo término en el vector  $z_n$ , por ejemplo  $z_{rn}$ .

La matriz homogénea de la ecuación A 6 admite soluciones no triviales solamente cuando:

$$\det ( \underline{K} - \omega_n^2 \underline{M} ) = 0 \quad (\text{A } 8)$$

Esta es una ecuación de grado  $N$  en  $\omega_n^2$  (si el sistema tiene  $N$  grados de libertad), llamada la ecuación característica del sistema. Su solución proporciona  $N$  raíces positivas, cuyas raíces cuadradas son las frecuencias naturales correspondientes.

En algunos sistemas es posible que una o más raíces sean iguales a cero. Sin embargo, esto no puede suceder en las

estructuras que aquí se analizan, ya que cuando menos una masa debe estar conectada al terreno por un resorte, y una frecuencia natural igual a cero implicaría una traslación de cuerpo rígido sin esfuerzos, lo que es impedido por la conexión al terreno.

Sustituyendo  $\omega_n^2$  en la ecuación A 7 se obtiene una ecuación matricial homogénea de orden  $n$ -ésimo en  $z_n$ . Por lo tanto, se puede elegir arbitrariamente el valor de cualquier término de este vector y determinar la forma del modo natural  $n$ -ésimo resolviendo la ecuación matricial; así, la escala del modo se fija arbitrariamente. Al hacer esto para cada valor de  $\omega_n^2$  determinamos las formas de todos los modos naturales.

Las raíces características  $\omega_n^2$  se conocen también como valores críticos o propios o eigenvalores. El conjunto de las amplitudes del modo  $z_n$ , constituye la  $n$ -ésima función característica, vector propio o eigenvector.

## APENDICE B

### PROBLEMA DE VALORES Y VECTORES CARACTERISTICOS. -

Una gran cantidad de problemas físicos y matemáticos llegan a establecer un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\underline{A} \underline{r} = \lambda \underline{r} \quad (B 1)$$

donde:  $\underline{A}$  es una matriz cuadrada de orden  $n \times n$

$\underline{r}$  es el vector característico

$\lambda$  es el valor característico

El sistema de ecuaciones expresado anteriormente se denomina como un problema de **VALORES Y VECTORES CARACTERISTICOS**.

De acuerdo a la Teoría del Algebra Lineal se demuestra

que existen  $n$  valores característicos  $\lambda_i$ , asociados a  $n$  vectores característicos  $r_i$ , los cuales son soluciones **NO TRIVIALES** del sistema:

$$(A - \lambda I) r = 0 \quad (B 2)$$

En el caso particular del problema de vibración libre de un sistema de  $n$  grados de libertad, el problema de valores y vectores característicos se establece de la siguiente manera:

$$(K - \lambda M) r = 0 \quad (B 3)$$

donde  $K$  y  $M$  son las matrices de rigideces y de masas respectivamente; los valores característicos  $\lambda_i$  y los vectores característicos  $r_i$  corresponden a las frecuencias al cuadrado y a las formas modales respectivamente.

En el problema establecido por la ecuación B 3 se pretende calcular los valores característicos  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$  y los vectores característicos  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ .

Los métodos de solución se pueden dividir en cuatro grupos de acuerdo a las características y propiedades básicas de los algoritmos de solución.

El primer grupo lo constituyen los métodos conocidos como de iteración vectorial y la propiedad que cumplen es:

$$\underline{K} \underline{r}_i = \lambda_i \underline{M} \underline{r}_i \quad (\text{B } 4)$$

El segundo grupo lo forman los llamados métodos de transformación en los cuales la propiedad básica es:

$$\underline{R}^T \underline{K} \underline{R} = \underline{\Lambda} \quad (\text{B } 5)$$

$$\underline{R}^T \underline{M} \underline{R} = \underline{I}$$

donde:  $\underline{R} = [ \underline{r}_1, \underline{r}_2, \underline{r}_3, \dots, \underline{r}_n ]$   
 $\underline{\Lambda} = \text{diag} ( \lambda_i ) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$   
 $\underline{I} = \text{la matriz identidad}$

En el tercer grupo se encuentran los métodos llamados de iteración polinomial y la propiedad empleada es:

$$p ( \lambda_i ) = 0 \quad (\text{B } 6)$$

donde:

$$p ( \lambda ) = \det ( \underline{K} - \lambda \underline{M} ) \quad (\text{B } 7)$$

En el cuarto grupo se emplea la propiedad de la Serie de Sturm de los polinomios característicos:

$$p(\lambda) = \det(\underline{K} - \lambda \underline{M}) \quad (B 8)$$

y

$$p^{(r)}(\lambda^{(r)}) = \det(\underline{K}^{(r)} - \lambda^{(r)} \underline{M}^{(r)}) \quad (B 9)$$

donde  $p^{(r)}(\lambda^{(r)})$  es el polinomio característico del  $r$ -ésimo problema restringido asociado a su correspondiente ecuación  $\underline{K}_r = \lambda \underline{M}_r$ .

De todos ellos, es de interés en el cálculo de fuerzas sísmicas dinámicas conocer los vectores característicos normalizados respecto a la matriz de masas (B 5) por lo que se comentan a continuación las características de los métodos de transformación y se desarrolla el Método de Jacobi.

### B.1 METODOS DE TRANSFORMACION

Se ha establecido que los métodos de transformación, comprenden un grupo de procedimientos para la solución de sistemas característicos en la matriz  $\underline{R}$  (Matriz Modal Normalizada) tales que:

$$\underline{R}^T \underline{K} \underline{R} = \underline{\Lambda} \quad (B 9)$$

$$\underline{R}^T \underline{M} \underline{R} = \underline{I} \quad (B 10)$$

donde la matriz  $\underline{R}$ , de orden  $n \times n$ , la cual diagonaliza a  $\underline{K}$  y  $\underline{M}$  en la forma que se muestra en las ecuaciones B 9 y B 10, es única, y se construirá por medio de iteraciones.

El propósito básico es reducir a  $\underline{K}$  y  $\underline{M}$  a la forma diagonal usando pre- y post- multiplicaciones sucesivas de matrices  $\underline{P}_k^t$  y  $\underline{P}_k$  respectivamente, donde  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ . Específicamente si se define  $\underline{K}_1 = \underline{K}$  y  $\underline{M}_1 = \underline{M}$  se obtendrá:

$$\underline{K}_2 = \underline{P}_1^t \underline{K}_1 \underline{P}_1$$

$$\underline{K}_3 = \underline{P}_2^t \underline{K}_2 \underline{P}_2$$

.....

(B 11)

.....

$$\underline{K}_{(k+1)} = \underline{P}_k^t \underline{K}_k \underline{P}_k$$

de la misma forma:

$$\underline{M}_2 = \underline{P}_1^t \underline{M}_1 \underline{P}_1$$

$$\underline{M}_3 = \underline{P}_2^t \underline{M}_2 \underline{P}_2$$

.....

(B 12)

.....

$$\underline{M}_{(k+1)} = \underline{P}_k^t \underline{M}_k \underline{P}_k$$

donde las matrices  $\underline{P}_k$  son seleccionadas para conseguir que  $\underline{K}_k$  y  $\underline{M}_k$  sean matrices diagonales. Entonces, para un procedimiento correcto, aparentemente se necesita tener:

$$\underline{K}_{k+1} \longrightarrow \underline{\Lambda} \quad \text{y} \quad \underline{M}_{k+1} \longrightarrow \underline{I} \quad \text{(B 13)}$$

cuando  $k \longrightarrow \infty$ , en cuyo caso:

$$\underline{R} = \underline{P}_1 \underline{P}_2 \dots \underline{P}_l \quad \text{(B 14)}$$

donde l indica la última iteración.

En la práctica no es necesario que  $\underline{M}_{k+1}$  converja a  $\underline{I}$  y  $\underline{K}_{k+1}$  a  $\underline{\Lambda}$ , pero si es necesario que converjan a la forma diagonal. A saber, si:

$$\underline{K}_{k+1} \longrightarrow \text{diag} (K_r) \quad \text{y} \quad \underline{M}_{k+1} \longrightarrow \text{diag} (M_r) \quad \text{cuando } k \longrightarrow \infty$$

entonces si indicamos con l la última iteración y haciendo

caso omiso de que los valores característicos y los vectores característicos pueden no estar en el orden usual:

$$\underline{\Lambda} = \text{diag} \left( \frac{K_r^{(l+1)}}{M_r^{(l+1)}} \right) \quad (\text{B } 15)$$

$$\underline{R} = \underline{P}_1 \underline{P}_2 \dots \underline{P}_l \text{diag} \left( \frac{1}{\sqrt{M_r^{(l+1)}}} \right) \quad (\text{B } 16)$$

## B.2 NORMALIZACION

Se han propuesto diferentes métodos iterativos usando la idea básica descrita anteriormente. En este trabajo sólo se discutirá el Método de Jacobi, el cual es uno de los mas usados y efectivos.

Como sea, se debe notar que, alternativamente, se podrá primero intentar transformar el problema de valores característicos a una forma que es mas práctica de usar en la iteración.

En particular, cuando  $\underline{M} = \underline{I}$ , las primeras  $m$  transformaciones en B 11, se pueden utilizar para reducir a  $\underline{K}$  a la forma tridiagonal sin iteraciones, después de lo cual las matrices  $\underline{P}_i$ ,  $i = m + 1, \dots, l$  se aplican de una manera iterativa para obtener  $\underline{K}_{m+1}$  en forma diagonal, en cuyo caso las primeras matrices  $\underline{P}_1, \dots, \underline{P}_m$  deben ser de forma diferente a las matrices que se apliquen posteriormente  $\underline{P}_{m+1}$

,.....,  $P_1$ .

### B.3 METODO DE JACOBI

El Método de Jacobi, se desarrolló para la solución de problemas característicos estándar (en donde  $M$  es la matriz identidad). El método fue propuesto hace un siglo y se ha usado extensamente. Una gran ventaja de este procedimiento es su simplicidad y estabilidad. Ya que las propiedades de los vectores característicos dados por B 5 se aplican a todas las matrices simétricas  $K$  sin restricción en los valores característicos, el Método de Jacobi puede calcular valores característicos positivos, negativos y nulos.

Si se considera el problema estándar  $K r = \lambda r$ , la  $n$ -ésima iteración definida por B 11 se reduce a:

$$K_{k+1} = P_k^T K P_k \quad (B 17)$$

donde  $P_k$  es una matriz ortogonal.

En la solución de Jacobi, la matriz  $P_k$  es una matriz rotacional la cual se forma de tal manera que los elementos que están fuera de la diagonal en  $K_k$  son nulos.

Si el elemento  $(i, j)$  se reduce a cero, la correspondiente matriz ortogonal  $P_k$  es:



trabaja con la parte triangular superior o inferior de la matriz, incluyendo los elementos de la diagonal principal.

Un importante punto para enfatizar es que aunque la transformación B 17 reduce los elementos fuera de la diagonal en  $K_k$ , a cero, este elemento puede ser diferente de cero durante la transformación siguiente. Por lo tanto, para el propósito de un algoritmo real, se debe decidir cuál elemento se reducirá a cero.

Un procedimiento que se ha usado muy eficientemente es el Método del Umbral o Entrada de Jacobi, en el cual los elementos fuera de la diagonal son probados secuencialmente, a saber, renglón por renglón (columna por columna), y se aplica una rotación sólo si el elemento es mayor que el valor de entrada en esa iteración. Para definir un valor apropiado de entrada se notará que, físicamente, en la diagonalización de  $K$  se puede reducir el acoplamiento entre los grados de libertad  $i$  y  $j$ . Una medida de este acoplamiento se da por  $(k_{ij}^2 / k_{ii} k_{jj})^{1/2}$ , y es este factor el que se puede usar eficientemente en decidir cuándo aplicar una rotación.

Además para tener un valor de entrada realista y tolerable, es necesario también medir la convergencia. Como se describió anteriormente,  $K_{k+1} \rightarrow \Lambda$  cuando  $k \rightarrow \infty$ , pero en un proceso numérico se busca solo una pequeña aproximación para los valores característicos y sus correspondientes

vectores característicos. Si se considera a l como la última iteración, se tiene, para la precisión requerida:

$$\underline{k}_{l+1} = \hat{\underline{k}} \quad (\text{B } 20)$$

Entonces se dice que la convergencia para una tolerancia  $\epsilon$  está dada por:

$$\frac{|k_{ii}^{(l+1)} - k_{ii}^{(l)}|}{k_{ii}^{(l+1)}} \leq 10^{-\epsilon} \quad (\text{B } 21)$$

para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

y

$$\left[ \frac{(k_{ij}^{(l+1)})^2}{k_{ii}^{(l+1)} k_{jj}^{(l+1)}} \right]^{1/2} \leq 10^{-\epsilon} \quad (\text{B } 22)$$

para toda  $i, j$  donde  $i < j$ .

## APENDICE C

### METODO $\beta$ DE NEWMARK PARA ECUACIONES DE UN GRADO DE LIBERTAD. -

Al suponer la variación de la aceleración relativa asociada a cada grado de libertad del sistema, como una función lineal a lo largo del intervalo de integración dado por  $[t_0, t_1]$ , se tiene:

$$\ddot{u}_\tau = \ddot{u}_0 + \frac{\tau}{\Delta t} (\ddot{u}_1 + \ddot{u}_0) \quad (C1)$$

donde  $\tau \in [t_0, t_1]$ .

Al integrar sucesivamente la ecuación C1, con las condiciones iniciales:

$$\dot{u}_\tau \Big|_{\tau=t_0} = \dot{u}_0 \quad \text{y} \quad u_\tau \Big|_{\tau=t_0} = u_0$$

se obtiene:

$$\dot{u}_\tau = \dot{u}_0 + \tau \ddot{u}_0 + \frac{\tau^2}{2 \Delta t} (\ddot{u}_1 - \ddot{u}_0) \quad (C2)$$

$$u_\tau = u_0 + \tau \dot{u}_0 + \frac{\tau^2}{2} \ddot{u}_0 - \frac{\tau^3}{6 \Delta t} (\ddot{u}_1 - \ddot{u}_0) \quad (C3)$$

Las expresiones C2 y C3 son las ecuaciones predictoras implícitas en  $u_1$ .

Para  $\tau = \Delta t$ , las ecuaciones C1 a C3 en función de  $t_1$  son:

$$\ddot{u}_1 = \ddot{u}_1 \quad (C4)$$

$$\dot{u}_1 = \dot{u}_0 + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) \quad (C5)$$

$$u_1 = u_0 + \Delta t \dot{u}_0 + \frac{\Delta t^2}{6} (\ddot{u}_1 + 2 \ddot{u}_0) \quad (C6)$$

La forma explícita de las ecuaciones predictoras requiere determinar las aceleraciones,  $\ddot{u}_1$ , al final del paso. Para lo anterior se usa la ecuación de movimiento para  $t = t_1$ .

Al sustituir las ecuaciones C4 a C6 en la ecuación de equilibrio dinámico se tiene:

$$\begin{aligned} M \ddot{u}_1 + C \left[ \dot{u}_0 + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_1 + \ddot{u}_0) \right] + K \left[ u_0 + \Delta t \dot{u}_0 + \right. \\ \left. + \frac{\Delta t^2}{6} (\ddot{u}_1 + 2 \ddot{u}_0) \right] = F_{E1} \end{aligned} \quad (C7)$$

De la ecuación anterior tenemos que:

$$\ddot{\underline{u}}_1 = \underline{E} [ - \underline{C} \underline{a} - \underline{K} \underline{b} + \underline{F}_{\underline{u}_1} ] \quad (\text{C8})$$

donde:

$$\underline{E} = [ \underline{M} + \frac{\Delta t}{2} \underline{C} + \frac{\Delta t^2}{6} \underline{K} ]^{-1} \quad (\text{C9})$$

$$\underline{a} = \dot{\underline{u}}_0 + \frac{\Delta t}{2} \ddot{\underline{u}}_0 \quad (\text{C10})$$

$$\underline{b} = \underline{u}_0 + \Delta t \dot{\underline{u}}_0 + \frac{\Delta t^2}{3} \ddot{\underline{u}}_0 \quad (\text{C11})$$

Al quedar definida en C8 la aceleración al final del intervalo, las ecuaciones C5 y C6 se expresan como:

$$\dot{\underline{u}}_1 = \underline{a} + \frac{\Delta t}{2} \ddot{\underline{u}}_1 \quad (\text{C12})$$

$$\underline{u}_1 = \underline{b} + \frac{\Delta t^2}{6} \ddot{\underline{u}}_1 \quad (\text{C13})$$

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- K. J. Bathe, E. L. Wilson, "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice Hall (1976)
- 2.- F. Vera Badillo, "Solución de Ecuaciones Algebraicas en el Analisis Estructural", Tesis Profesional, Escuela de Ingeniería ULSA, (1980)
- 3.- J. Ceballos Blanco, "Integración de las Ecuaciones de Equilibrio Dinámico de las Estructuras Sometidas a Temblores", Tesis Profesional, Escuela de Ingeniería ULSA, (1980)
- 4.- Reglamento de Construcción para el Distrito Federal, México 1987.
- 5.- D. J. Dowrick, "Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos", Limusa, (1984)
- 6.- N. M. Newmark, E. Rosenblueth, "Fundamentos de Ingeniería Sísmica", Diana, (1976)
- 7.- R. Cervantes P., V. Porras S., "Fuerzas Sísmicas y su distribución en los elementos resistentes de edificios regulares", Memorias del 1o Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, (1977)
- 8.- J. Manzano J., "Distribución de Fuerzas Sísmicas en edificios irregulares", Tesis Profesional UPAEP, 1984

**TABLAS**







TABLA 4.4

<b>ACELEROGRAMA</b>	<b>A R C H I V A D O</b>
<b>NOMBRE:</b>	
<b>FECHA:</b>	<b>HOJA:</b> /
$\Delta t =$	
<b>Nombre del ACELEROGRAMA archivado:</b>	
<b>Nombre del ACELEROGRAMA a CREAR:</b>	

TABLA 4.5

<b>ACELEROGRAMA</b>		<b>M O D I F I C A D O</b>	
<b>NOMBRE:</b>			
<b>FECHA:</b>		<b>HOJA:</b> /	
<b>Nombre del ACELEROGRAMA archivado:</b>			
<b>Intervalo de TIEMPO de este ACELEROGRAMA:</b>			
<b>Nombre del ACELEROGRAMA ha crear:</b>			
<b>Intervalo de TIEMPO de este ACELEROGRAMA:</b>			
<b>TIEMPO INICIAL para este ACELEROGRAMA:</b>			
<b>TIEMPO FINAL para este ACELEROGRAMA:</b>			

**TABLA 5.1**

<b>OBRA:</b> EJEMPLO 1			
<b>USUARIO:</b> GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA			
<b>FECHA:</b> SEPTIEMBRE DE 1990			
<b>DATOS DE LA ESTRUCTURA</b>			
NIVEL	PESO	ALTURA	RIGIDEZ
	(ton)	(m)	(ton/cm)
1	400.00	3.00	70.00
2	400.00	6.00	50.00
3	200.00	9.00	30.00

TABLA 5.2

ACELEROGRAMA NORMALIZADO			
NOMBRE: GERARDO DE JESUS LOPEZ ARCIGA			
FECHA: SEPTIEMBRE DE 1990		HOJA: 1 / 1	
NUMERO DE DATOS: 10		$\Delta t = 0.02$ seg	
TIEMPO INICIAL: 0.0			
Dato	Aceleracion (cm/s <sup>2</sup> )	Dato	Aceleracion (cm/s <sup>2</sup> )
1	0.00		
2	43.40		
3	59.30		
4	8.30		
5	-80.30		
6	1.50		
7	84.40		
8	-41.50		
9	-39.80		
10	17.50		

**TABLA 5.3**

**DATOS DE LA ESTRUCTURA PARA EL EJEMPLO 3**

NIVEL	ENTREPISO	PESOS (ton)	ALTURA (m)	RIGIDEZ (ton/cm)
1		343.82	2.8	-
2	1	343.82	5.6	699.76
3	2	342.72	8.4	386.40
4	3	341.72	11.2	343.11
5	4	341.72	14.0	318.92
6	5	340.52	16.8	313.06
7	6	339.42	19.6	308.59
8	7	339.42	22.4	291.94
9	8	337.24	25.2	288.21
10	9	335.04	28.0	282.96
11	10	335.04	30.8	246.18
12	11	332.86	33.6	241.57
13	12	330.64	36.4	233.96
14	13	330.64	39.2	184.67
15	14	379.74	42.0	174.26
	15			149.34

**TABLA 5.4****RESULTADOS EJEMPLO 2. METODO DE SUPERPOSICION MODAL****1000 DATOS**

NIVEL	DESPLAZAMIENTO (cm)	VELOCIDAD (cm/s)	ACELERACION (cm/s <sup>2</sup> )
1	3.7903E-01	2.7276E+00	2.9766E+01
2	8.8777E-01	6.6601E+00	7.1164E+01
3	1.4318E+00	1.1361E+01	1.2769E+02

**RESULTADOS EJEMPLO 2. METODO GENERALIZADO DE NEWMARK****1000 DATOS**

NIVEL	DESPLAZAMIENTO (cm)	VELOCIDAD (cm/s)	ACELERACION (cm/s <sup>2</sup> )
1	3.8531E-01	2.8527E+00	3.2227E+01
2	9.0636E-01	7.0378E+00	7.8027E+01
3	1.4707E+00	1.2178E+01	1.4270E+02

**RESULTADOS EJEMPLO 2. METODO DE SUPERPOSICION MODAL****500 DATOS**

NIVEL	DESPLAZAMIENTO (cm)	VELOCIDAD (cm/s)	ACELERACION (cm/s <sup>2</sup> )
1	2.6466E-01	1.8658E+00	1.9554E+01
2	6.1754E-01	4.5077E+00	4.6417E+01
3	9.9058E-01	7.5734E+00	8.1330E+01

**TABLA 5.4**  
**(CONTINUACION)**

**RESULTADOS EJEMPLO 2. METODO GENERALIZADO DE NEWMARK**  
**500 DATOS**

<b>NIVEL</b>	<b>DESPLAZAMIENTO (cm)</b>	<b>VELOCIDAD (cm/s)</b>	<b>ACELERACION (cm/s<sup>2</sup>)</b>
1	2.7226E-01	2.0090E+00	2.2694E+01
2	6.4004E-01	4.9483E+00	5.4746E+01
3	1.0378E+00	8.5507E+00	9.9905E+01

**TABLA 5.5**

**RESULTADOS EJEMPLO 3. METODO DE SUPERPOSICION MODAL**

**20 DATOS**

NIVEL	DESPLAZAMIENTO (cm/s)	VELOCIDAD (cm/s)	ACELERACION (cm/s <sup>2</sup> )
1	1.5403E-02	4.2260E-01	1.6713E+00
2	4.1565E-02	2.9357E-01	1.1024E+00
3	7.1262E-02	8.1841E-01	3.1977E+00
4	1.0619E-01	6.2839E-01	2.3284E+00
5	1.4580E-01	4.4288E-01	1.2392E+00
6	1.8485E-01	5.6538E-01	1.6166E+00
7	2.2586E-01	7.8953E-01	2.5020E+00
8	2.6386E-01	9.8359E-01	3.2310E+00
9	3.0585E-01	1.7229E+00	6.3432E+00
10	3.2717E-01	1.1845E+00	3.8275E+00
11	3.4675E-01	1.1518E+00	3.5303E+00
12	3.7334E-01	1.2296E+00	3.7465E+00
13	4.0595E-01	1.7681E+00	6.1314E+00
14	4.1193E-01	1.3493E+00	4.0948E+00
15	4.2046E-01	1.3596E+00	4.0785E+00

**RESULTADOS EJEMPLO 3. METODO GENERALIZADO DE NEWMARK**

**20 DATOS**

NIVEL	DESPLAZAMIENTO (cm)	VELOCIDAD (cm/s)	ACELERACION (cm/s <sup>2</sup> )
1	1.6882E-01	4.8514E-01	7.6981E+00
2	4.6893E-01	1.3365E+00	1.2029E+01
3	7.9834E-01	2.2678E+00	1.4546E+01
4	1.1407E+00	3.2330E+00	1.6871E+01
5	1.4742E+00	4.1692E+00	1.9257E+01
6	1.7938E+00	5.0623E+00	2.1682E+01
7	2.1090E+00	5.9393E+00	2.4111E+01
8	2.4022E+00	6.7529E+00	2.6313E+01
9	2.6716E+00	7.4990E+00	2.8231E+01
10	2.9448E+00	8.2563E+00	3.0071E+01
11	3.1832E+00	8.9198E+00	3.1626E+01
12	3.3854E+00	9.4861E+00	3.2942E+01
13	3.5833E+00	1.0046E+01	3.4297E+01
14	3.7285E+00	1.0462E+01	3.5391E+01
15	3.8200E+00	1.0727E+01	3.6144E+01

## TABLA 6.1

### TIEMPOS UTILIZADOS EN LOS PROCESOS

#### TIEMPO DE INGRESO DE DATOS GENERALES

EJEMPLO 2: 2 minutos

EJEMPLO 3: 5 minutos

#### TIEMPOS PARA LA OBTENCION DE LOS ACELEROGRAMAS:

ARCHIVO: ACE1 3 min y 7 seg (1000 datos)

ARCHIVO: ACE2 2 min y 5 seg (500 datos)

ARCHIVO: ACE3 0 min y 15 seg (20 datos)

#### TIEMPOS DE PROCESAMIENTO DE INFORMACION

##### METODO DE SUPERPOSICION MODAL

1000 DATOS 20 min y 17 seg

500 DATOS 6 min y 37 seg

20 DATOS 1 hora 9 min y 16 seg

##### METODO GENERALIZADO DE NEWMARK

1000 DATOS 1 min y 52 seg

500 DATOS 1 min y 6 seg

20 DATOS 2 min y 55 seg

## TABLA 6.2

### MEMORIA UTILIZADA EN LOS EJEMPLOS

ARCHIVO ORIGINAL: 340 000 BYTES

ARCHIVO SIS2: 149 000 BYTES

ARCHIVO ACE1: 13 000 BYTES

ARCHIVO ACE2: 6 500 BYTES

ARCHIVO ACE3: 300 BYTES

#### EJEMPLO 2

METODO DE SUPERPOSICION MODAL

500 DATOS 150 000 BYTES

1000 DATOS 150 000 BYTES

METODO GENERALIZADO DE NEWMARK

500 DATOS 2000 BYTES

1000 DATOS 2000 BYTES

#### EJEMPLO 3

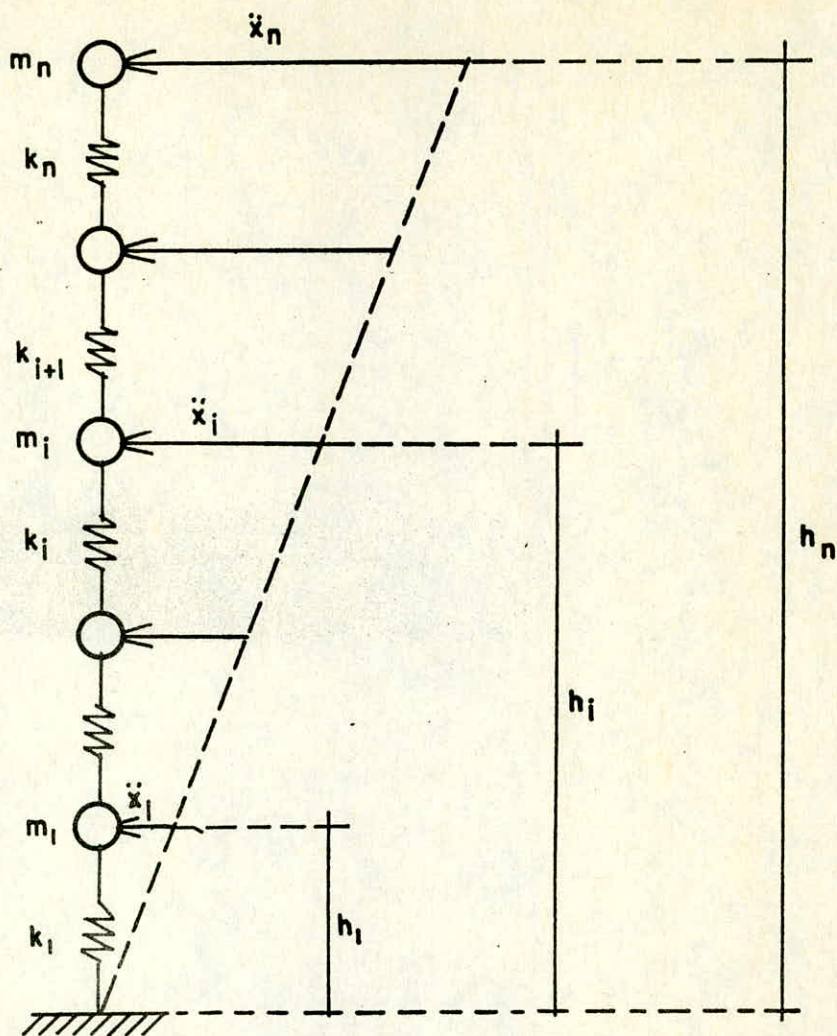
METODO DE SUPERPOSICION MODAL

20 DATOS 27 500 BYTES

METODO GENERALIZADO DE NEWMARK

20 DATOS 17 600 BYTES

**FIGURAS**



- $m_i$  masa del nivel  $i$ -ésimo
- $k_i$  rigidez del entrepiso  $i$ -ésimo
- $h_i$  altura del nivel  $i$ -ésimo
- $\ddot{x}_i$  aceleración del nivel  $i$ -ésimo
- $n$  número de niveles

FIG. I.1 IDEALIZACION DE UN EDIFICIO  
REGULAR

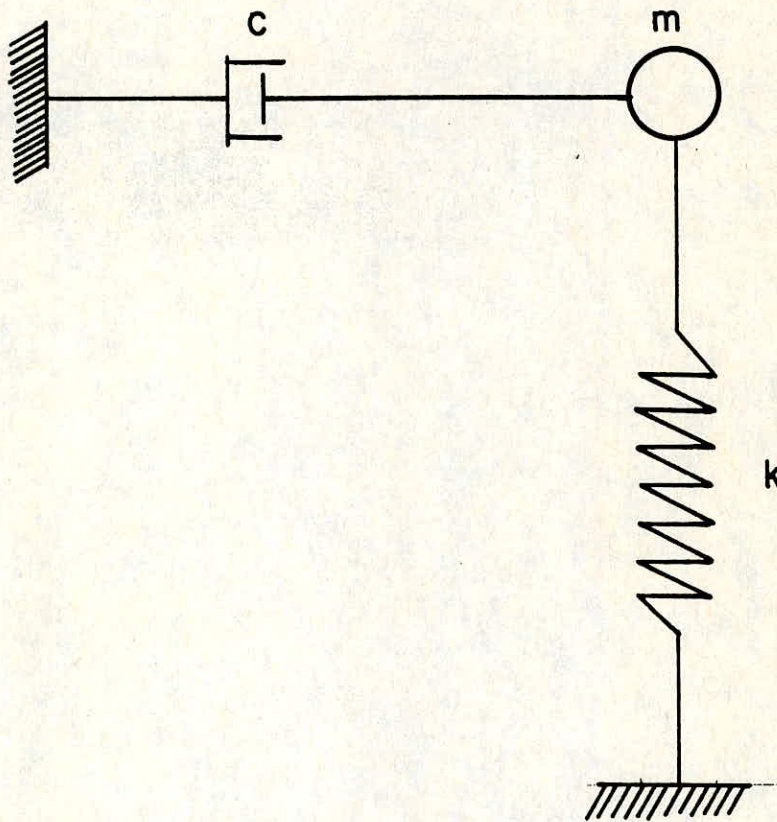


FIG. I.2 MODELO DE UN SOLO GRADO DE LIBERTAD CON AMORTIGUAMIENTO.

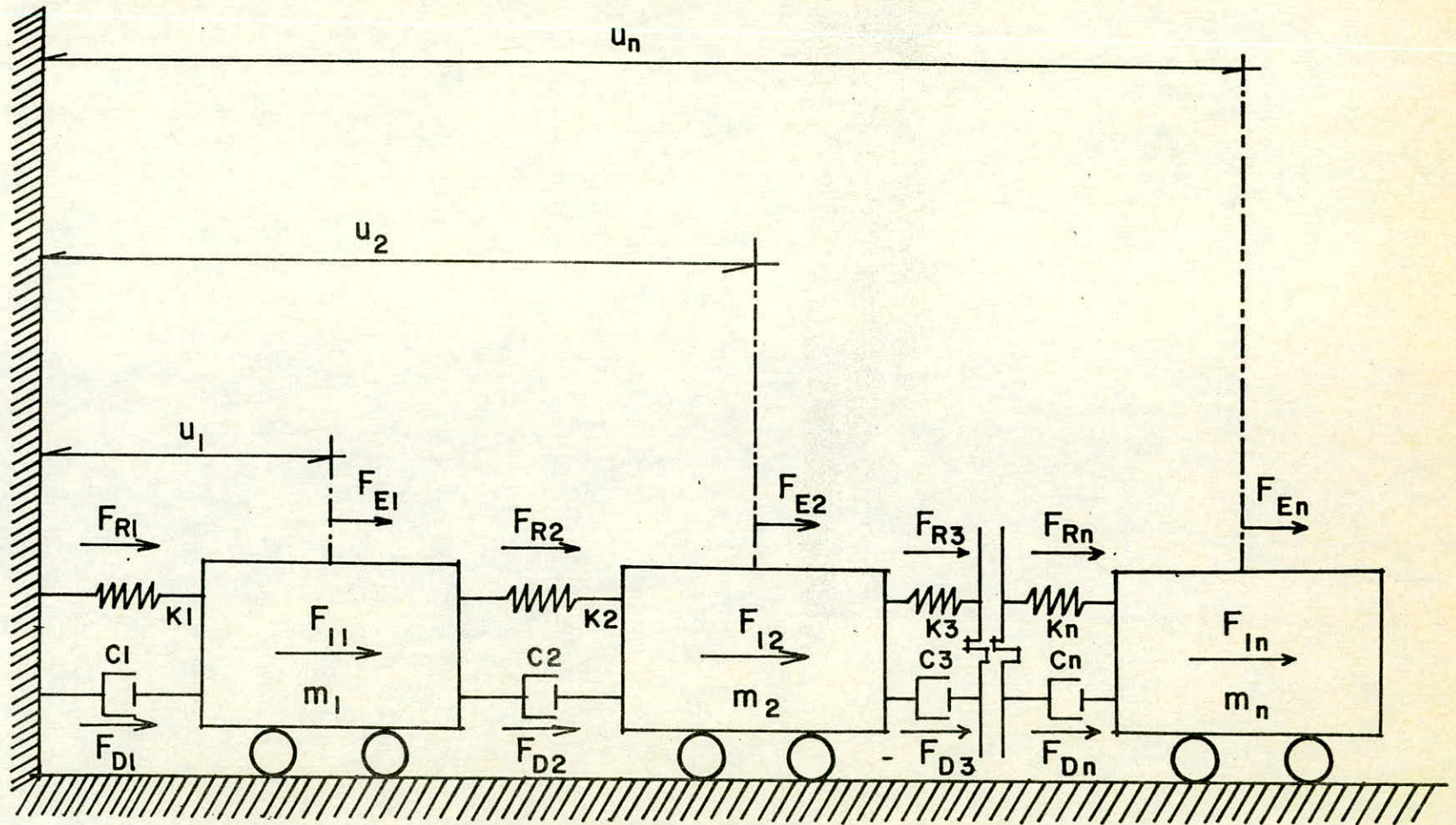


FIG. I.3 SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

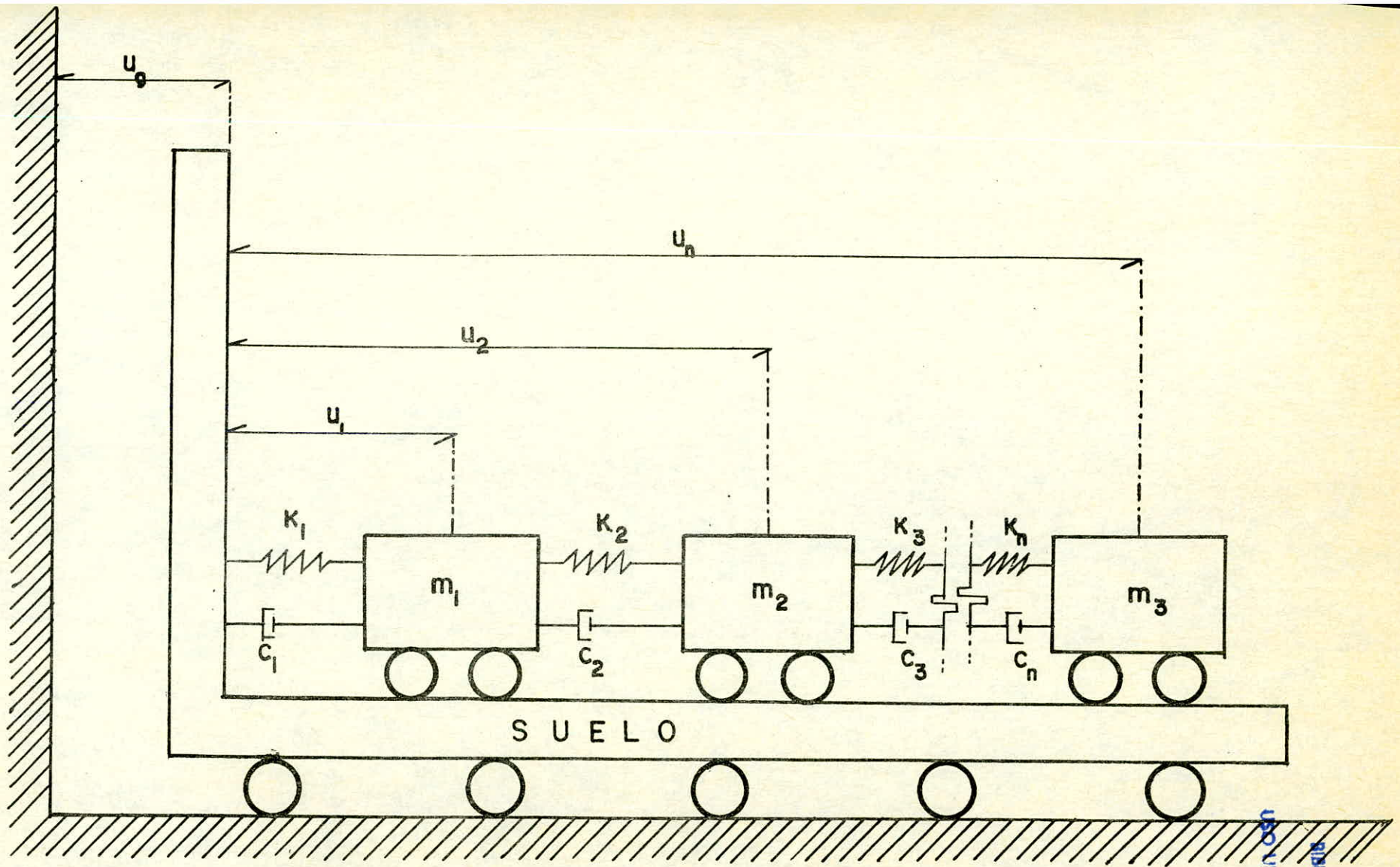


FIG. 1.4 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL MOVIMIENTO DE LA ESTRUCTURA SUELO EN UN TEMBLOR

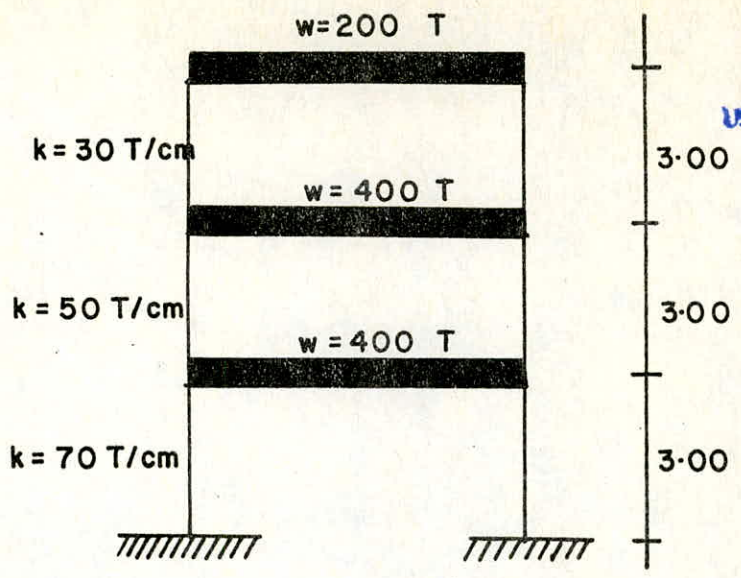


FIG. 5.1 EJEMPLO 1

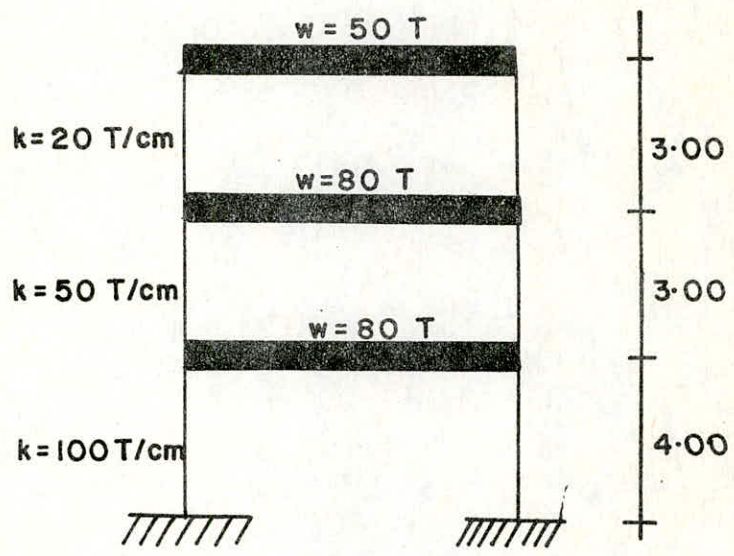


FIG. 5.2 EJEMPLO 2

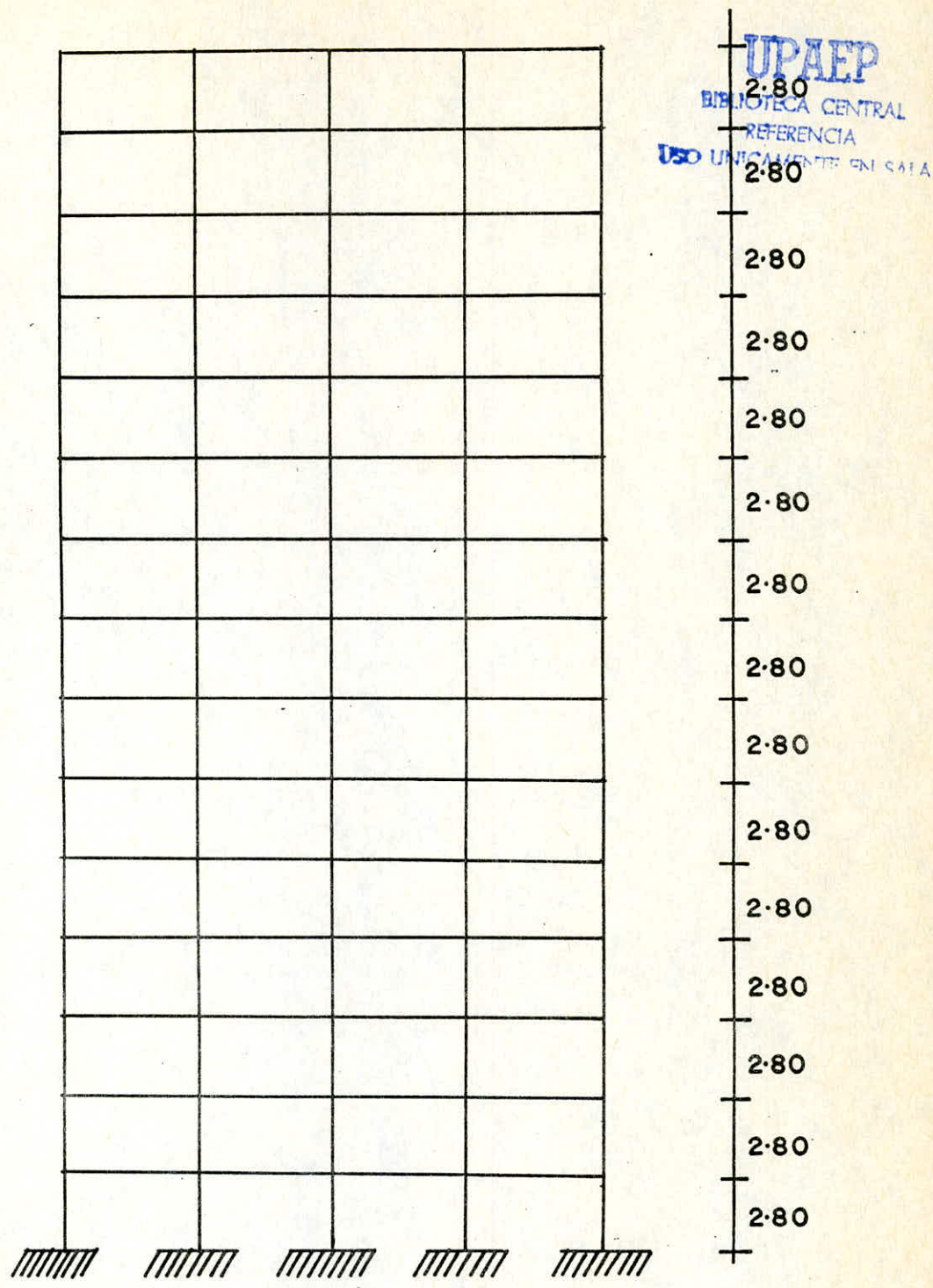


FIG. 5.3 EJEMPLO 3