

## **NEW FUNCTIONS OF THE CEINCI-LAB SYSTEM FOR 3-D SEISMIC ANALYSIS**

**Roberto Aguiar<sup>(1)</sup>, Brian Cagua<sup>(2)</sup>, Julia Pilatasig<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Profesor. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos.

Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí  
[rraguiar@espe.edu.ec](mailto:rraguiar@espe.edu.ec)

<sup>(2)</sup>Maestría en Estructuras. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. [bjcagua@espe.edu.ec](mailto:bjcagua@espe.edu.ec)  
[jepilatasig3@espe.edu.ec](mailto:jepilatasig3@espe.edu.ec)

Received: May 2019. Accepted: July 2019

### **ABSTRACT**

Without losing the objective of the **CEINCI-LAB** computer system that is didactic, this article presents new functions that facilitate the three-dimensional drawing of a structure and the data entry of the sections of its elements in structures formed only by beams and columns

With these new functions, it will be very easy to perform a spatial seismic analysis of a regular structure in plan and elevation, by the Spectral Method. The calculation of the stiffness matrix in floor coordinates is the most complicated, so its calculation is detailed.

**keywords:** New functions of **CEINCI-LAB**. Spectral method. Floor coordinates.

## **NUEVAS FUNCIONES DEL SISTEMA *CEINCI-LAB* PARA ANÁLISIS SÍSMICO ESPACIAL**

### **RESUMEN**

Sin perder el objetivo del sistema de computación **CEINCI-LAB** que es didáctico, en este artículo se presentan nuevas funciones que facilitan el dibujo en tres dimensiones de una estructura y la entrada de datos de las secciones de sus elementos en estructuras conformadas solo por vigas y columnas.

Con estas nuevas funciones, va a ser muy fácil realizar un análisis sísmico espacial de una estructura regular en planta y elevación, por el Método Espectral. El cálculo de la matriz de rigidez en coordenadas de piso es lo más complicado por lo que se detalla su cálculo.

**Palabras Claves:** Nuevas funciones de **CEINCI-LAB**. Método espectral. Coordenadas de piso.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de computación **CEINCI-LAB** está orientado al ámbito académico, por lo que el usuario debe saber cómo se resuelve una estructura ante cargas estáticas o la forma de realizar el análisis sísmico de un edificio en tres dimensiones.

Para lograr el último objetivo, en este artículo, se presentan nuevas funciones que permiten graficar y analizar sísmicamente una estructura en tres dimensiones, de esta manera el usuario va a estar motivado en realizar un análisis espacial, ya que sabe que la entrada de datos es muy sencilla.

Se le ayuda en el ingreso de la geometría de la estructura, pero se sigue manteniendo el espíritu de **CEINCI-LAB** en el sentido de que es un programa didáctico en que el usuario debe saber la secuencia de cálculo y afianzar sus conocimientos con la realización de ejercicios.

Este artículo es un complemento al desarrollado por Aguiar *et al.* (2019) en que se presentaron nuevas funciones, pero para el caso plano. Estas funciones se requieren para el análisis espacial.

## 2. FUNCIONES DE **CEINCI-LAB**

Antes de presentar las nuevas funciones del sistema de computación **CEINCI-LAB**, se recomienda al lector ver las funciones básicas que se encuentran en Aguiar (2014) y las nuevas funciones que se presentaron en Aguiar *et al.* (2019), estas últimas muy rápidamente son:

- **$[nv, np, nudt, nudcol, nudvg, nod, nr]=geometria\_nudo\_viga(sv, sp)$**

El programa ***geometria\_nudo\_viga*** facilita notablemente el ingreso de datos de la geometría de un pórtico regular; los datos de ingreso son: ***sv*** que es un vector que contiene las luces de cada uno de los vanos; ***sp*** es otro vector con la altura de cada uno de los pisos. El programa reporta: ***nv*** número de vanos; ***np*** número de pisos; ***nudt*** es el número de elementos totales, se recuerda que en cada viga se considera un nudo en la mitad; ***nudcol*** es el número de columnas; ***nudvg*** es el número de vigas; ***nod*** es el número de nudos; ***nr*** es el número de nudos restringidos.

- **$[X, Y]=glinea\_portico2(nv, np, sv, sp, nod, nr)$**

Este programa es similar a la función ***glinea\_portico*** (ver funciones básicas de **CEINCI-LAB**, en Aguiar, 2014), pero la entrada de datos es diferente. Determinar los dos vectores ***X***, ***Y*** con parte de los resultados que reporta el programa anterior. Solo sirve para pórticos regulares, considerando nudo en la mitad de las vigas.

- **[NI,NJ]=gn\_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg)**

Programa similar a **gn\_portico** que determina los vectores con las coordenadas del nudo inicial y final denominados **NI,NJ** pero en esta ocasión los datos de entrada son diferentes.

- **[GEN]=geometria\_nudo\_diagonales(nv, np, nudt, mar)**

La función **geometria\_nudo\_diagonales** está orientada a la generación de contravientos de acero en forma de “V” invertida, y se debe utilizar después de los programas: **geometria\_nudo\_viga** y **gn\_portico2**, con los que se generan los vectores **NI,NJ**, que contienen el nudo inicial de la estructura conformada por columnas y vigas. Los tres primeros datos han sido ya indicados, resta por indicar que **mar** es un vector que contiene el número del vano que tiene un contraviento; para el efecto se deben numerar primero los vanos desde abajo hacia arriba y de izquierda a derecha.

El programa reporta una matriz **GEN** que contiene el número del elemento diagonal, el número del nudo inicial de ese elemento y el número del nudo final. Se destaca que los programas que se han presentado numeran primero los elementos columnas, luego los elementos vigas y finalmente los elementos de las diagonales en forma de V invertida, empezando desde el primer piso hasta el último y desde la izquierda a derecha pero solo numera en los vanos que han sido identificados en el vector **mar**

La matriz **GEN** en cada fila tiene 7 datos; el primero de ellos identifica el elemento, el segundo el nudo inicial, el tercero el nudo final y los cuatro datos restantes son cero. Esto es porque después se debe utilizar el programa **gn\_portico** para obtener los vectores con los nudos iniciales y finales exclusivamente de los elementos de las diagonales. A estos vectores en lo que sigue se denominan **NI2, NJ2**.

- **[NI,NJ]=gn\_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2)**

Con el programa **gn\_portico2** se obtienen dos vectores **NI, NJ**, que contienen los nudos iniciales y finales de los elementos, pero de la estructura sin contravientos en forma de V invertida. Luego una vez que se ha ejecutado el programa **geometria\_nudo\_diagonales**, se utiliza el programa **gn\_portico** para determinar los vectores con los nudos iniciales y finales de las diagonales, que se han denominado **NI2, NJ2**.

Por lo tanto, este momento se tiene cuatro vectores, dos de ellos **NI, NJ** con los nudos inicial y final del pórtico conformado por vigas y columnas; adicionalmente se tiene otros dos vectores **NI2, NJ2**, con los nudos iniciales y finales de las diagonales.

Para tener en un solo vector todos los nudos iniciales **NI**, y todos los nudos finales **NJ**, de toda la estructura: columnas, vigas y diagonales, se utiliza el programa **gn\_portico3** que genera esta información, con los datos anteriores

obtenidos en forma parcial (primero sin las diagonales **NI, NJ** y segundo solo de las diagonales **NI2, NJ2**).

### 3. NUEVAS FUNCIONES DE CEINCI-LAB

Las nuevas funciones que se indican en este apartado, sirven para graficar la estructura en tres dimensiones, para el ingreso de las secciones de los elementos y para el análisis sísmico espacial considerando un modelo de piso rígido con tres grados de libertad por planta.

- **[X,Y,Z,nvgY,nportz,nodA]=glinea\_portico3D(CoordY,nr,np,nv,sp,nod,X,Y)**

Este programa genera las coordenadas de los nudos: X, Y, Z de la estructura espacial. Los datos a ingresar: **CoordY** vector con las coordenadas de los pórticos en dirección Y (metros), para ello se recomienda ponerse unos ejes de referencia X, Y en la parte inferior izquierda de la estructura. El usuario primero indica la geometría de los Pórticos en sentido X; en efecto, para cada pórtico da las luces entre vanos (sv) y la altura de piso (sp). Ahora falta definir la geometría en sentido Y, para ello en el archivo **CoordY** se debe indicar a que distancia acumulada se halla cada pórtico en sentido X, con respecto al eje de referencia impuesto.

Los restantes datos de esta función son: **nr** número de restricciones; **np** número de pisos; **nv** número de vanos; **sp** vector con la altura de pisos en metros; **nod** número de nudos; **X** coordenadas "X" de los nudos; **Y** coordenadas "Y" de los nudos.

Este programa reporta: **Z** coordenadas "Z" de los nudos; **nportz** Número de pórticos en Y; **nvgY** Número de vigas en Y; **nodA** Número de nudos adicionales (nudo medio de las vigas en Y). **NOTA:** Los X, Y de datos son las coordenadas del marco plano base, pero este programa toma estos valores y genera las coordenadas de los nudos considerando XY el plano de la base y elevación al eje Z.

- **[NI,NJ]=gn\_portico3D(nudcol,nudvg,nvgY,nportz,nod,nudt,nodA,NI,NJ)**

Programa para generar el Nudo inicial y final de los elementos denominados **NI, NJ** pero de la estructura en tres dimensiones. Los datos de ingreso son: **nudcol** número de columnas; **nudvg** número de vigas; **nvgY** Número de vigas en Y; **nportz** Número de pórticos en Y; **nod** número de nudos; **nudt** número de elementos; **nodA** Número de nudos adicionales (nudo medio de las vigas en Y); **NI, NJ** Vectores con los nudos iniciales y finales generados, para un pórtico en el plano XZ.

- **[nnud,nelem,nudtY,nudvgYZ,nudcolYZ,nodY,numPortX,numPortY]=geometri a\_nudo\_vigaYZ(nportz,nr,np,nudt,nvgY,X)**

Este programa es solo para pórticos regulares que facilitan el ingreso de datos y el entendimiento sobre la generación de la geometría del pórtico y nos ayuda a determinar la **KL** en análisis 3D.

Los datos a ingresar son: **nportz** Número de pórticos en el plano XZ; **nr** Número de nudos restringidos, que vendrá a ser igual al número de pórticos que se tienen en el plano YZ; **np** número de pisos; **nudt** Número de elementos totales (Considerando 2 por viga por nudo intermedio) en un pórtico en el plano XZ; **nudvg** Número de vigas; **X** Coordenadas en X de los nudos.

El programa reporta: **nnud** que es el número de nudos de la estructura en 3D; **nelem** es el número total de elementos de la estructura en 3 dimensiones, considerando que en cada viga se tienen 2 elementos por la presencia del nudo en el centro de luz; **nudtY** es el número de elementos totales en el plano YZ; **nudvgYZ** determina el número de vigas en el plano YZ; **nudcolYZ** es el número de columnas en el plano YZ; **nodY** es el número de nudos en el plano YZ; **numPortX** es el número total de pórticos en sentido X; **numPortY** es el número total de pórticos en sentido Y.

- **dibujo3D(X,Y,Z,NI,NJ)**

Programa para dibujar una estructura tridimensional, este programa ayuda a visualizar en 3 dimensiones la estructura. Los datos a ingresar son: **X** Vector que contiene coordenadas en X; **Y** Vector con las coordenadas en Y, **Z** Vector que contiene coordenadas en Z; **NI** Vector con los nudos iniciales de los elementos; **NJ** Vector con los nudos finales de los elementos.

- **[ELEMX,ELEMY]=gelem\_portico3D(Secciones,numPortX,numPortY,np,nudt,nudvgYZ,nudcol,nelem)**

Este programa determina, para el caso de estructuras de hormigón armado, la base y la altura de la sección transversal de todos los elementos. En el archivo **ELEMX** se tiene la base y altura de los elementos de los pórticos en sentido X; en el archivo **ELEMY** se cambia la base y altura de las columnas de los pórticos en X, por altura y base que tendrían en sentido Y, a más de ello se determinan las secciones de las vigas en sentido Y.

Los datos a ingresar son: **Secciones** Matriz con todas las secciones ingresadas por pórtico en XZ y vigas por niveles **[i,b,h,nig,ii]** en donde, **b** Base de la sección del elemento, **h** Altura de la sección del elemento, **nig** Número de elementos a generar, **ii** Incremento en la numeración de los elementos; **numPortX**, **numPortY** Número de pórticos en X e Y; **np** Número de pisos; **nudt** Elementos totales de un pórtico en XZ; **nudvgYZ** Número de vigas totales de un pórtico en YZ; **nudcol** Número de columnas totales de un pórtico en XZ; **nelem** Número de elementos totales de la estructura en 3D

- $[ngli, ELEMxi, Li, senoi, cosenoi, Vci] = \text{Datos\_KLx\_3D}(i, NI, NJ, nudt, nod, nr, ELEM X, X, Z)$

Este programa permite generar los datos para calcular la rigidez de pórticos planos en la iteración para pórticos 3D. Los datos a ingresar son: **i** Indica el pórtico de análisis (Ej.  $i=1$ , Pórtico 1 y si  $i=n$ , Pórtico  $n$ ); **NI, NJ** Vectores con los nudos iniciales y finales generados; **nudt** número de elementos del pórtico; **nod** número de nudos del pórtico; **nr** número de restricciones del pórtico; **ELEM** Matriz que contiene la base y la altura de cada elemento o área e inercia si es acero; **X** coordenadas "X" de los nudos; **Y** coordenadas "Y" de los nudos, **Z** coordenadas en "Z" de los nudos.

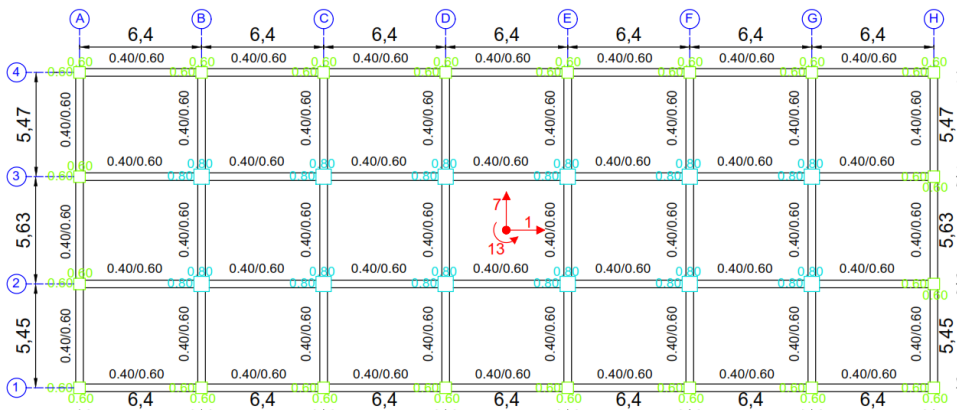
Lo que nos reporta el programa es lo siguiente: **ngli** Número de grados de libertad en el pórtico de análisis; **ELEMxi**, Matriz que contiene la base y la altura de cada elemento o área e inercia si es acero, pero del pórtico de análisis; **L** Vector que contiene la longitud de los elementos; **seno** Vector que contiene los senos de los elementos; **coseno** Vector que contiene los cosenos de los elementos; **VC** Matriz que contiene los vectores de colocación de elementos, nuevamente todo esto del pórtico de análisis en sentido X.

- $[ngli, ELEMyi, Li, senoi, cosenoi, Vci] = \text{Datos\_KLy\_3D}(i, NI, NJ, nudt, nudtY, nr, nudvgyZ, nudcolYZ, np, numPortY, numPortX, ELEM Y, Y, Z);$

Es similar al anterior, pero con los pórticos en sentido Y, por lo que se omite su descripción.

#### 4. ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURA EN 3 D

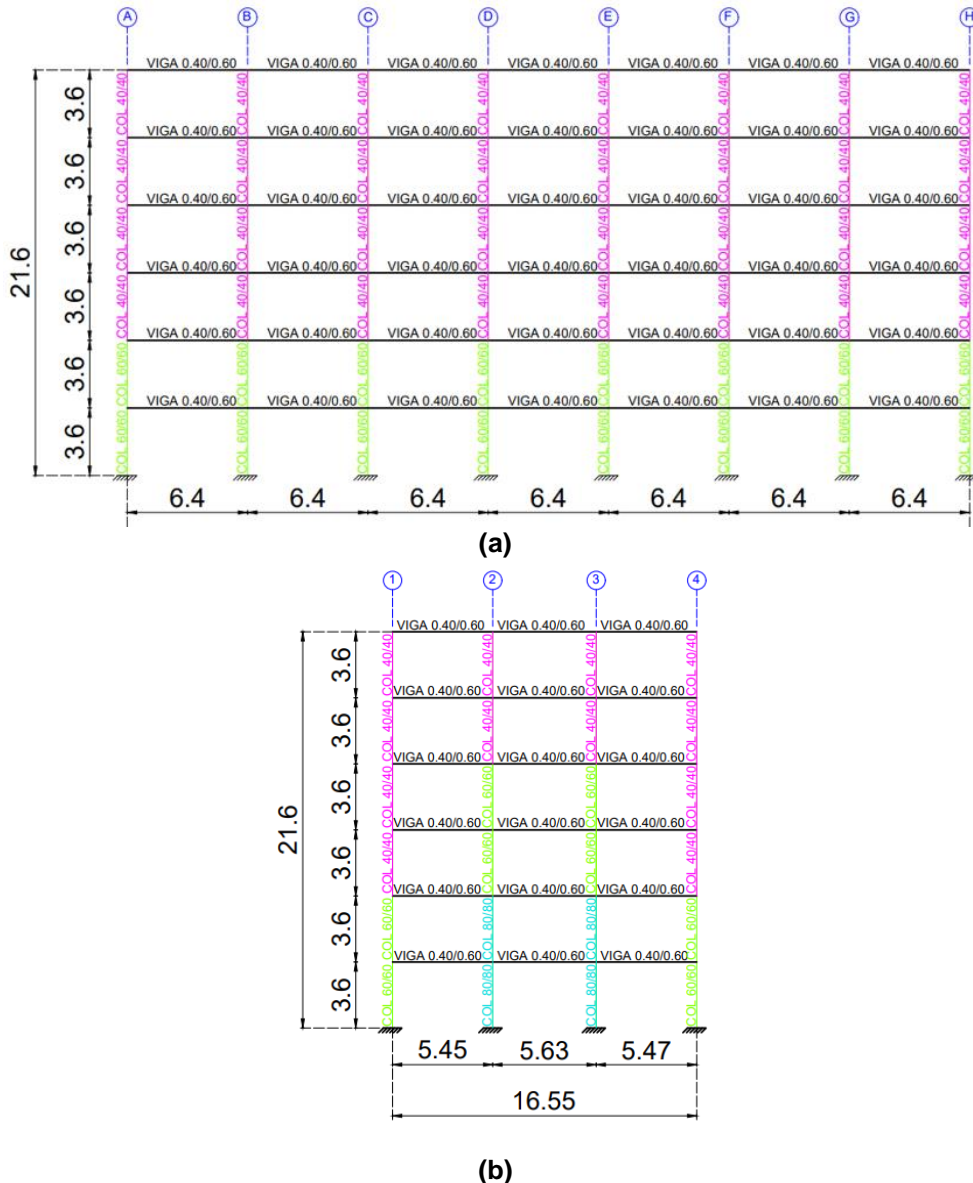
En este apartado se presenta el análisis sísmico, en sentido longitudinal de la estructura de 6 pisos de hormigón armado, cuya planta se presenta en la figura 1, tiene 4 pórticos en sentido X y 8 pórticos en sentido transversal. Con líneas de color rojo se indican los grados de libertad de la primera planta, en el centro de masas.



**Figura 1** Vista en planta de una estructura regular de 6 pisos de hormigón armado, en la cual se realiza el análisis sísmico considerando tres grados de libertad por planta.

#### 4.1 Ingreso de datos de geometría de estructura

En la figura 2 a, se indica la geometría del Pórtico 1 que es igual al 4 y en la figura 2 b, del pórtico transversal B. Nótese que las dimensiones de las columnas van cambiando, lo que se mantiene constante son las dimensiones de las vigas que son de 40/60 cm, todas, en los dos sentidos. A continuación, se indica la primera parte del programa que realiza el análisis sísmico e inmediatamente se van comentando la entrada de datos.



**Figura 2** a) Pórticos 1 y 4 del Bloque Estructural 2; b) Pórtico tipo interior en sentido Y del Bloque 2, las columnas centrales varían de 80/80 a 60/60 y a 40/40.

```

%% Geometria del pórtico
sv =[6.4;6.4;6.4;6.4;6.4;6.4;6.4]; %Ingresar un vector con la logitud de vanos en (metros)
sp =[3.6;3.6;3.6;3.6;3.6;3.6]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
CoordY=[0;5.45;11.08;16.55]; %Ingresar un vector con las coordenadas de los pórticos en direccion Y (metros)
%Propiedades del material
fc =240; % La resistencia a la compresión del hormigón f'c (kg/cm2)
E=150000*sqrt(fc); % Calcula el modulo de elasticidad del hotmigón (T/m2)

%% Secciones de los elementos en cada pórtico
Port1=[1 0.60 0.60 15 1; 17 0.4 0.4 31 1
      49 0.40 0.60 83 1]; % Secciones del Portico 1
Port2=[1 0.60 0.60 1 7;2 0.80 0.80 5 1;
      9 0.60 0.60 1 7;10 0.80 0.80 5 1;
      17 0.40 0.40 1 7; 18 0.60 0.60 5 1; % Secciones del Portico 2
      25 0.40 0.40 1 7; 26 0.60 0.60 5 1;
      33 0.40 0.40 15 1; 49 0.40 0.60 83 1];
VgXZ1=[1 0.40 0.60 47 1];% Vigas XZ del piso 1, es igual para Piso 2
Secciones=[Port1;Port2;Port2;Port1;
          VgXZ1;VgXZ1;VgXZ1;VgXZ1;VgXZ1;VgXZ1];

```

Los pórticos en sentido longitudinal, tienen 7 vanos de 6.4 m, cada uno; esa información se da en la variable “sv”; la altura de cada piso es de 3.6 m., (igual en todos los pisos) esto se da en la variable “sp” para la estructura de 6 pisos.

El primer dato de la variable CoordY es 0, que corresponde al Pórtico 1; el segundo dato es 5.45 que es la distancia al Pórtico 2; el tercero es 11.08 que es la distancia acumulada al Pórtico 3 y finalmente se tiene 16.55, distancia al Pórtico 4.

Con “sv”, “sp” y CoordY, se dibuja la estructura en tres dimensiones, claro está que se debe llamar a las funciones de **CEINCI-LAB** que preparan los datos para el dibujo, las mismas que se presentan después de la información inicial que se está comentando.

En el programa se presenta el valor de la resistencia del hormigón que es de  $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$  y la ecuación utilizada para calcular el módulo de elasticidad en  $\text{T/m}^2$ .

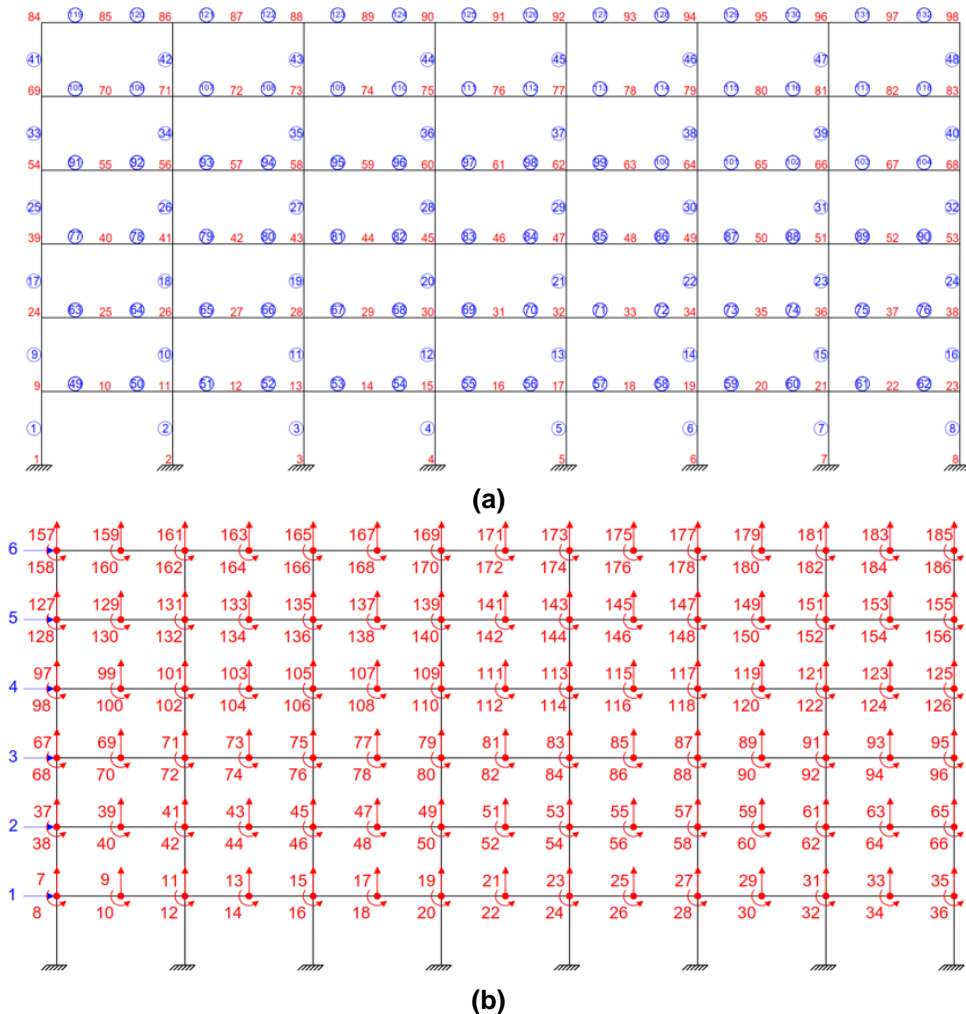
De la figura 2 a, se obtiene las secciones de los elementos que se indican en la variable “Port1” para entender estos datos en la figura 3 a, se presenta la numeración de nudos y elementos. Nótese que el modelo de análisis contempla un nudo en el punto medio de las vigas.

La información de “Port1” dice el elemento 1 es de 0.60 de base por 0.60 de altura, genere 15 elementos más que tienen la misma sección, con incremento en la numeración de 1; así se ha dado la información de las columnas del piso 1 y 2; después se pasa al elemento 17 cuya columna es de 0.40/0.40 y se le pide que genere 31 elementos más con incremento de 1 en la numeración, ya que todas las columnas del piso 3 al 6 son de 0.40/0.40 m. Finalmente se tiene que la viga 49 (ver figuras 3 a y 2 a) es de 0.40/0.60 m, y se pide generar 83 elementos más, debido a que se considera dos elementos por viga.

Para el pórtico intermedio 2, se da la información en forma similar y esto se tiene en el archivo “Port2”. El pórtico 1 es igual al 4 y el pórtico 2 al 3. Por lo



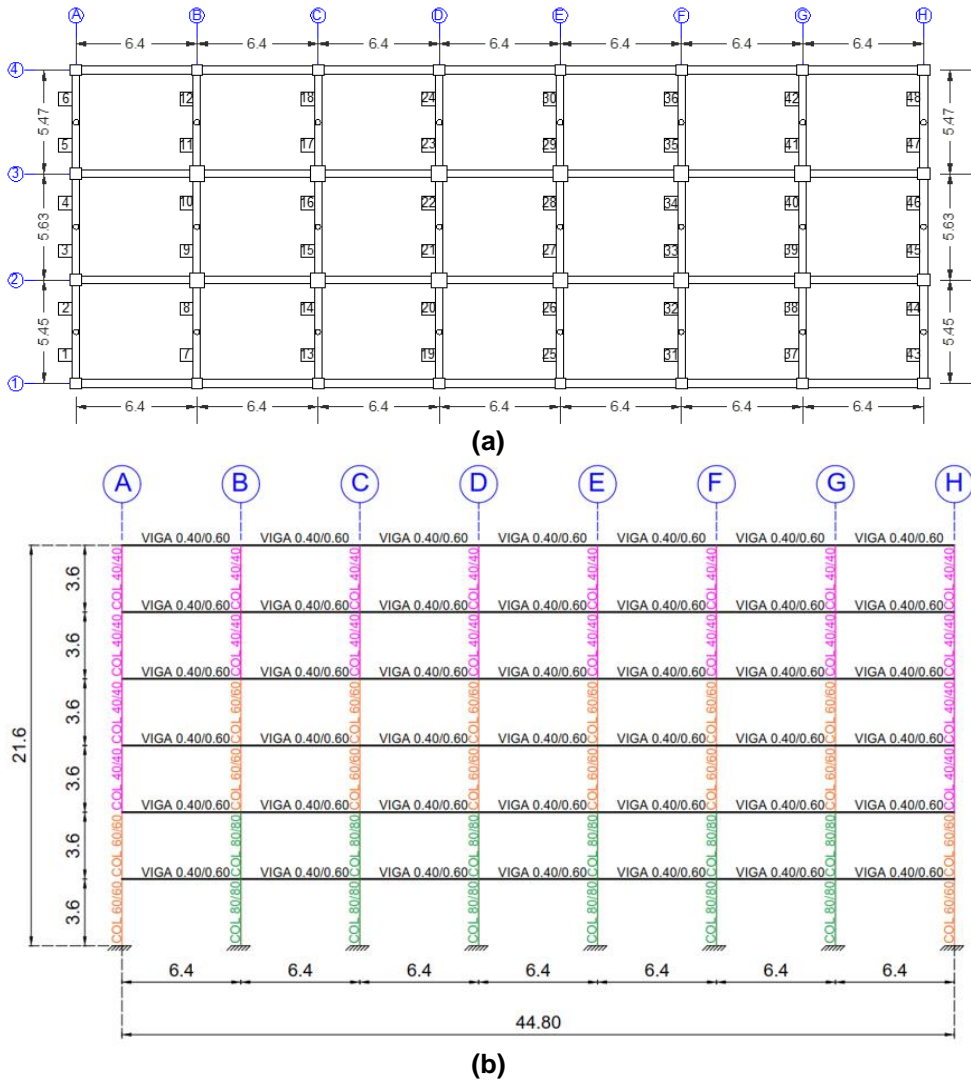
tanto ya se ha dado los datos de las secciones de todos los pórticos en sentido longitudinal.



**Figura 3** Pórtico en sentido X; a) Numeración de Nudos y Elementos; b) Numeración de los grados de libertad, con azul se indican las coordenadas principales.

Para tener la información completa de la geometría de todos los elementos, falta indicar las dimensiones de las vigas en sentido transversal, ya que la información de las columnas ya se ha dado.

El archivo VgXZ1 indica que la viga en sentido transversal 1 es de 0.40/0.60 y que se debe generar 47 vigas más con un incremento en la numeración de 1. En la figura 4 a, se indica la numeración de las vigas del primer piso en sentido transversal. Nótese que se empezó en el punto inferior izquierdo a numerar las vigas.



**Figura 4** a) Numeración de las vigas del primer piso en sentido transversal; b) Geometría del Pórtico 2 que es igual al 3.

En el archivo VgXZ1 se tienen todas las vigas del primer piso. Para cada piso se tiene un archivo de datos; en la estructura que se analiza todas las vigas son de 40/60 cm, en todos los pisos, por lo que el archivo VgXZ1, sirve para los pisos superiores.

En la figura 4 b, se muestran las secciones del pórtico 2, para que el lector comprenda la información del archivo “Port2”

Finalmente se tiene el archivo “Secciones” con la siguiente información:

Secciones = [Port1; Port2; Port2; Port1; VgXZ1; VgXZ1; VgXZ1; VgXZ1; VgXZ1; VgXZ1]

Con los datos del pórtico 1, del 2, del 3 y del 4. Se recuerda que el pórtico 1 es igual al 4 y que el pórtico 2 es igual al 3. Luego se indican las vigas en sentido transversal, se repite 6 veces el archivo VgXZ1 porque se tienen 6 pisos.

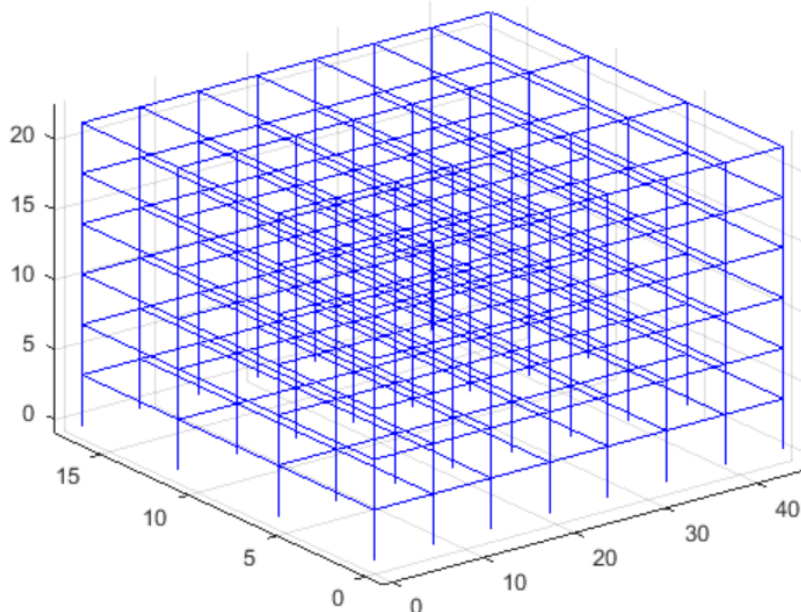
## 4.2 Dibujo de la estructura en 3D

La continuación del programa es como sigue, en que se llama a una serie de funciones que han sido ya comentadas y que preparan los datos para graficar la estructura en tres dimensiones con el programa **dibujo 3D** el mismo que se muestra en la figura 5.

```

%% Subrutinas para determinar la geometria del pórtico XZ
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
%% Porticos 3D (Pórtico YZ)
[X,Y,Z,nvgY,npportz,nodA]=glinea_portico3D(CoordY,nr,np,nv,sp,nod,X,Y);
[NI,NJ]=gn_portico3D(nudcol,nudvg,nvgY,npportz,nod,nudt,nodA,NI,NJ);
[nnud,nelem,nudtY,nudvgYZ,nudcolYZ,nodY,numPortX,numPortY]=geometria_nudo_vigaYZ(npportz,nr,np,nudt,nvgY,X);
%% Dibujar el modelo
dibujo3D(X,Y,Z,NI,NJ);
    
```

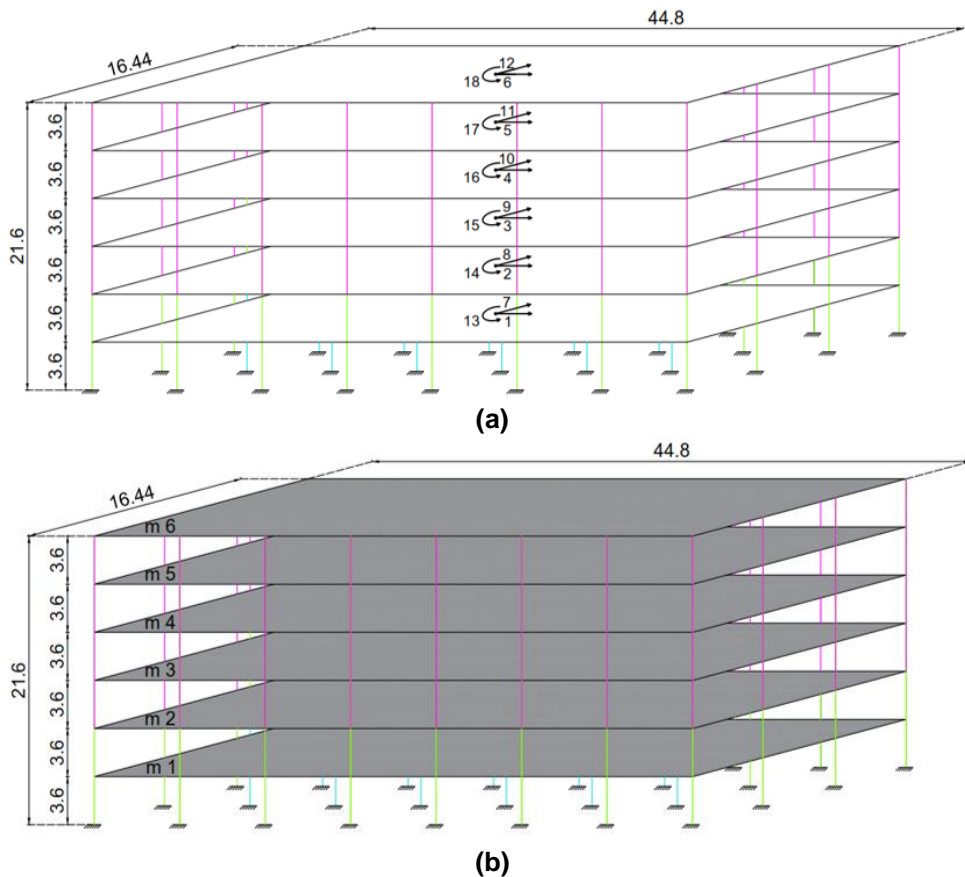
**Esquema Estructural**



**Figura 5** Dibujo en 3D, de estructura de 6 pisos que se está analizando sísmicamente con 3 grados de libertad por planta.

## 4.3 Análisis con modelo de tres grados de libertad por planta

En la figura 6 a, se presenta el modelo de tres grados de libertad por planta. Nótese que primer se han numerado todos los grados de libertad en sentido X, desde el primer piso hacia arriba; luego desplazamientos en sentido Y, finalmente las rotaciones de piso.



**Figura 6** a) Modelo de análisis sísmico considerando tres grados de libertad por planta; b) Modelación de las masas en piso rígido.

En el listado del programa que se indica a continuación, mediante el programa **gelem\_portico3D** se determinan dos archivos que contienen la base y la altura de los pórticos en sentido X, y en sentido Y, archivos que se han denominado: **ELEMx**, **ELEMy** (se puede emplear cualquier nombre).

Después se tiene un lazo para el número total de pórticos en sentido X, y lo primero que se hace es de la base de datos que se tienen para todos los pórticos en sentido X, se determinan los datos que permiten evaluar la matriz de rigidez lateral de un solo pórtico, esto se lo hace con: **Datos\_KLx\_3D**, con esta función se determina, el número de grados de libertad del pórtico; la base y la altura se halla en el archivo **ELEMxi**, la longitud de cada uno de los elementos del pórtico se encuentra en **Li**; el seno y coseno que permiten encontrar la matriz de rotación de coordenadas locales a globales se hallan en: **senoi**; **cosenoi**; el vector de colocación (grados de libertad del nudo inicial y final) se hallan en **VCi**; y el módulo de elasticidad del material **E**.

Con esta información se determina la matriz de rigidez del pórtico para los grados de libertad indicados en la figura 3 b; luego se realiza la condensación estática de la matriz de rigidez mediante la solución de ecuaciones lineales. **KL**. Esta matriz se la almacena en una matriz **KLXi**.

```
[ELEMx,ELEMy]=gelem_portico3D(Secciones,numPortX,numPortY,np,nudt,nudvgyZ,nudcol,nelem);
KLX=zeros(np,np);KLY=zeros(np,np);
%% Matriz de Rigidez Lateral en sentido X
for i=1:numPortX
% Datos para calcular la matriz de rigidez lateral "x" en cada paso
[nqli,ELEMxi,Li,senoi,cosenoi,VCi]=Datos_KLx_3D(i,NI,NJ,nudt,nod,nr,ELEMx,X,Z);
% Contribucion de elementos de hormigon
[K]=krigidez(nqli,ELEMxi,Li,senoi,cosenoi,VCi,E);
tit=['Matriz de rigidez lateral en sentido X del pórtico ', num2str(i)];
disp(tit)
% Condensacion de K
na=np;%gdl por planta, considerar na=np
kaa=K(1:na,1:na);kab=K(1:na,na+1:nqli);kba=kab';
kbb=K(na+1:nqli,na+1:nqli);
% Segunda forma de calculo con un sistema de ecuaciones
T=-kbb\kba;KL=kaa+kab*T;
KLXi((i-1)*np+1:i*np,:)=KL; %Almacena las matrices de rigidez de los pórticos en X
KLX=KLX+KL; %Sumar la matriz de rigidez de pórticos en X
end
disp('Matriz de rigidez lateral final en sentido X')
KLX; % Matriz de rigidez lateral del pórtico en X
```

$$KLXi = \begin{bmatrix} KL^{(1)} \\ KL^{(2)} \\ KL^{(3)} \\ KL^{(4)} \end{bmatrix}$$

Finalmente en la variable  $KLX$  se van sumando las matrices de rigidez lateral de los pórticos en sentido X, de tal manera que:

$$KLX = \sum_{i=1}^{npx} KL^{(i)}$$

Donde la sumatoria se extiende al número de pórticos en sentido X, denominada  $npx$  en la fórmula o numPortX, en el programa.

En el sentido Y, se realiza lo propio, por lo que solo se presenta el listado del programa sin explicación. Solo se indica que se halla

$$KLYi = \begin{bmatrix} KL^{(A)} \\ KL^{(B)} \\ KL^{(C)} \\ KL^{(D)} \\ KL^{(E)} \\ KL^{(F)} \\ KL^{(G)} \\ KL^{(H)} \end{bmatrix}$$

$$KLY = \sum_{i=1}^{npy} KL^{(i)}$$

```

%% Matriz de Rigidez Lateral en sentido Y
for i=1:numPortY
    [ngli,ELEMYi,Li,senoi,cosenoi,VCi]=Datos_KLy_3D(i,NI,NJ,nudt,nudtY,nr,nudvgYZ,nudcolYZ,np,numPortY,numPortX,ELEMY,n

    % Contribucion de elementos de hormigon
    [K]=krigidez(ngli,ELEMYi,Li,senoi,cosenoi,VCi,E);

    tit=['Matriz de rigidez lateral en sentido Y del pórtico ', num2str(i)];
    disp(tit)

    % Condensacion de K
    na=np; %gdl por planta, considerar na=np
    kaa=K(1:na,1:na); kab=K(1:na,na+1:ngli); kba=kab'; kbb=K(na+1:ngli,na+1:ngli);
    % Segunda forma de calculo con un sistema de ecuaciones
    T=-kbb\kba; KL=kaa+kab*T;
    KLYi((i-1)*np+1:i*np,:)=KL; %Almacena las matrices de rigidez de los pórticos en Y
    KLY=KLY+KL; %Sumar la matriz de rigidez de pórticos en Y
end
disp('Matriz de rigidez lateral final en sentido Y')
KLY; % Matriz de rigidez lateral del pórtico en Y

```

Para encontrar la matriz de rigidez en coordenadas de piso se utiliza el programa: **matriz\_es**, también se puede utilizar el programa **matriz\_es1**. Los datos de entrada para el primero de los programas son los siguientes:

- **[KE,rtet,A]=matriz\_es(ntot,iejes,np,r,KLT,RT);**

Donde: *notot* es el número total de pórticos de la estructura; *iejes* es el número de pórticos en el sentido de análisis; *np* es el número de pisos; *r* es la distancia del centro de masas al pórtico, se da un solo valor por pórtico y sirve solo para estructuras regulares en planta y elevación; *KLT* matriz que contiene todas las matrices de rigidez lateral de los pórticos, primero en sentido X, luego en sentido Y; *RT* es una matriz con las distancias del centro de masas al pórtico en cada uno de los pisos, esta variable se utiliza en estructuras irregulares.

Los programas presentados son para estructuras regulares en planta y elevación por lo que se debe indicar al programa  $RT=0$ . Cuando se ejecuta este programa pregunta si la estructura es regular o irregular; en el caso de regulares va a trabajar solo con la variable *r*, para estructuras irregulares con *RT*.

El programa reporta: *KE* que es la matriz de rigidez en coordenadas de piso; *rtet* es una matriz que contiene, las matrices con las distancias del centro de masas a cada uno de los pórticos y en cada piso. Finalmente encuentra la matriz de compatibilidad *A*, entre las coordenadas de piso y las coordenadas laterales de los pórticos. Aguiar (2012, 2014).

El programa que se lista a continuación, determina las coordenadas del Centro de Masas *Xcm*, *Ycm*; encuentra el número total de pórticos y el número de pórticos en el sentido de análisis sísmico.

En una tabla se prepara los datos para determinar el vector *r*, con la distancia del Centro de Masas al pórtico y también se determina el ángulo  $\alpha$ ; que es el ángulo que forma la orientación positiva del pórtico con el eje X. Para pórticos en sentido X, vale 0 y para pórticos en sentido Y, vale 90 . Solo resta llamar al programa **matriz\_es** para encontrar la matriz de rigidez en coordenadas de piso.

```

Xcm=X(nr,1)/2;
Ycm=CoordY(end,1)/2;
ntot=numPortX+numPortY;
iejes=numPortX;
table=zeros(ntot,4); %Matriz con las columnas: /NumPort/Sentido/alfa/rPiso
% En la columna de Sentido 1 es para X 2 para Y
o=1;
for i=1:ntot
    if i <= numPortX
        table(i,1)=i;
        table(i,2)=1;
        table(i,3)=0;
        table(i,4)=Ycm-CoordY(i,1);
    else
        table(i,1)=o;
        table(i,2)=2;
        table(i,3)=pi/2;
        table(i,4)=X(o,1)-Xcm;
        o=o+1;
    end
end
r=table(:,4);
RT=r; % Esto se debe a que es regular
KLT=[KLXi;KLYi];
[KE,rtet,A]=matriz_es(ntot,iejes,np,r,KLT,RT);

```

Para que se comprueben los resultados, a continuación se presenta la submatriz de la matriz de rigidez en coordenadas de piso, denominada  $K_{xx}$

$$K_{xx} = \begin{bmatrix} 524980 & -253330 & 40148 & -4860.3 & 253.5 & 17.6 \\ -253330 & 268270 & -114640 & 19957 & -1066 & 62.3 \\ 40148 & -114640 & 153970 & -79199 & 7474.9 & -437.6 \\ -4860.3 & 19957 & -79199 & 100870 & -41853 & 4180.5 \\ 253.5 & -1066 & 7474.9 & -41853 & 69314 & -34074 \\ 17.6 & 62.3 & -437.6 & 4180.5 & -34074 & 30238 \end{bmatrix}$$

#### 4.4 Propiedades dinámicas

La filosofía de **CEINCI-LAB** es que el usuario también programe algo, para que de esta manera conozca más lo que está haciendo, por esta razón no se utilizó ningún programa para el cálculo de la matriz de masas en coordenadas de piso.

A continuación, se indica la carga permanente  $D$  considerada en  $T/m^2$ , en cada uno de los pisos; lo propio la carga transitoria  $L$ , y el cálculo de la matriz de masas en primer lugar y de los períodos, modos y frecuencias de vibración. Para que se pueda seguir el cálculo se debe indicar que el período fundamental de vibración es 0.97 segundos.

```

area=(Xcm*2)*(Ycm*2);
D1=0.9516; %Carga muerta T/m2
L1=0.3; %Carga viva T/m2
D2=0.8801;D3=0.881;D4=0.8648;D5=0.8685;D6=0.7869;
m1=area*(D1+L1*0.25)/9.81; J1=m1/12*((Xcm*2)^2+(Ycm*2)^2);
m2=area*(D2+L1*0.25)/9.81; J2=m2/12*((Xcm*2)^2+(Ycm*2)^2);
m3=area*(D3+L1*0.25)/9.81; J3=m3/12*((Xcm*2)^2+(Ycm*2)^2);
m4=area*(D4+L1*0.25)/9.81; J4=m4/12*((Xcm*2)^2+(Ycm*2)^2);
m5=area*(D5+L1*0.25)/9.81; J5=m5/12*((Xcm*2)^2+(Ycm*2)^2);
m6=area*(D6+L1*0.25)/9.81; J6=m6/12*((Xcm*2)^2+(Ycm*2)^2);
m=mdiag(m1,m2,m3,m4,m5,m6);
J=mdiag(J1,J2,J3,J4,J5,J6);
M=mdiag(m,m,J);%Colocar las masas de cada piso en una diagonal
[T,fi,OM]=orden_eig(KE,M);

```

#### 4.5 Método Espectral

De igual manera el usuario debe programar el cálculo de los factores de participación modal. Luego de ello llama a dos programas el uno denominado **espectros\_manta** que determina las aceleraciones espectrales para cada período de vibración, empleando el espectro obtenido en la ciudad de Manta del terremoto de 2016 ( $M=7.8$ ); cuando se ejecuta este programa por pantalla el usuario debe indicar para que componente desea la respuesta. En este ejemplo se halló para la componente N-S. El otro programa que se emplea es el denominado **desplazamientos\_modales\_CQC** que encuentra primero los desplazamientos en coordenadas de piso, en cada modo de vibración y luego utiliza el criterio de combinación modal, denominada: Combinación Cuadrática Completa, para encontrar las respuestas definitivas

```

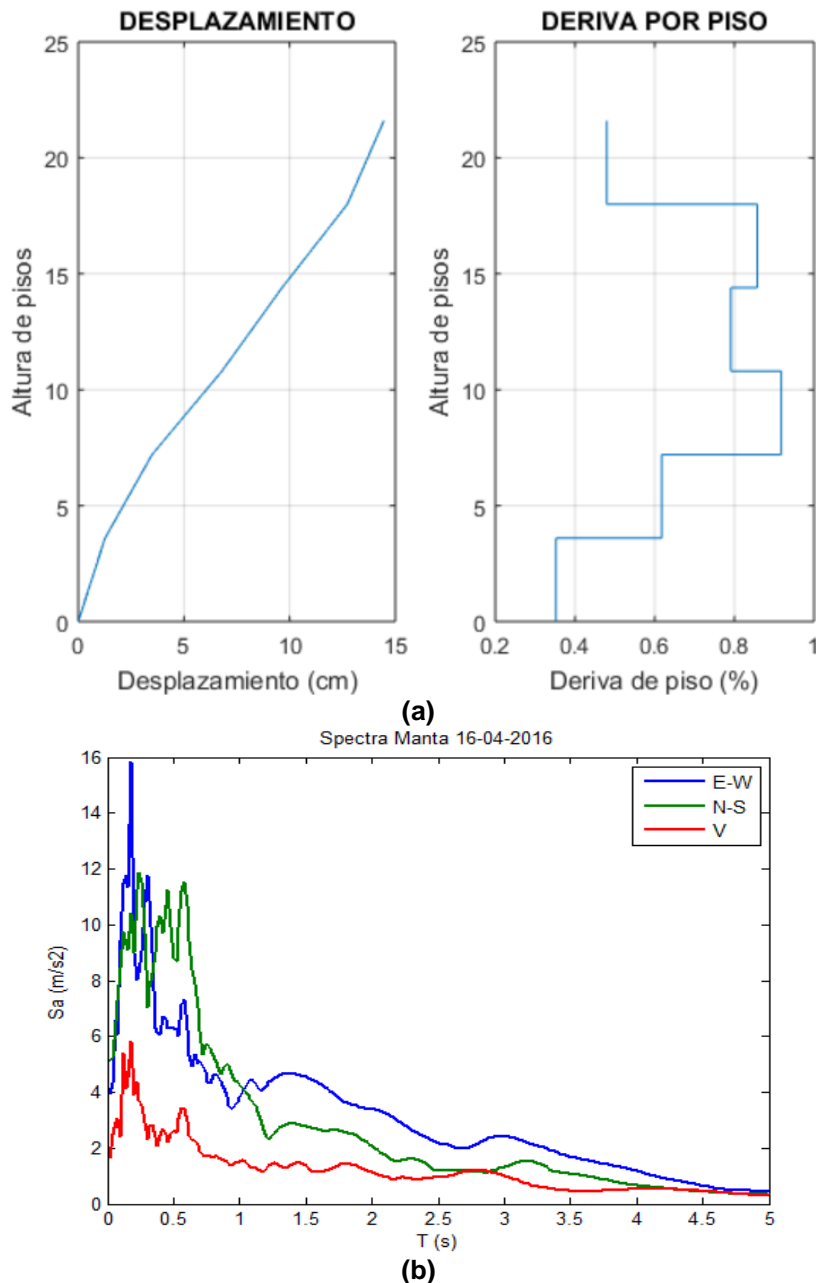
% Factores de participacion modal para el Analisis Longitudinal
bx=[1;1;1;1;1;1];by=[0;0;0;0;0;0];bz=[0;0;0;0;0;0];
b=[bx;by;bz];na=18;
for i=1:na
    gama(:,i)=abs(((fi(:,i))^M*b)/((fi(:,i))^M*(fi(:,i))));
end
zeda=0.05;R=1;fip=1;fie=1.0;
[Ad]=espectros_manta(T);
[qte]=desplazamientos_modales_CQC(T,fi,Ad,gama,na,OM,zeda);

for i=1:6
    qti(i)=R*fip*fie*qte(i);
end
YY=[0;3.6;7.2;10.8;14.4;18;21.6];
figure(1)
[Derv]=deriva(YY,qti)

```



Al final se tiene el cálculo de los desplazamientos laterales y derivas de piso, para el sentido longitudinal (para los 6 primeros grados de libertad que se muestran en la figura 6 a). Los resultados se indican en la figura 7 a, para la componente Norte Sur del espectro de Manta, que se muestra en la figura 7 b.



**Figura 7** a) Desplazamientos laterales y derivas de piso máximas probables encontradas, en sentido longitudinal (sentido X); b) Espectros hallados con los registros de Manta del terremoto, de Pedernales, del 16 de abril de 2016 de magnitud 7.8.

## 5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Manteniendo el objetivo principal, del sistema de computación **CEINCI-LAB** de ser un programa académico, para que el usuario sepa paso a paso como está realizando el análisis sísmico espacial de una estructura, se han presentado nuevas funciones con las cuales se dibuja muy fácilmente en 3 D, la estructura y la entrada de datos de las secciones de sus elementos lo realiza en una forma muy fácil.

Los programas del sistema de computación **CEINCI-LAB** que aquí se han presentado se encuentran en el siguiente link:

<http://departamentos.ulead.edu.ec/ingenieria-sismica/interfase-en-matlab-basica/>

## REFERENCIAS

1. Aguiar R., Cagua B., Pilatasig J., Zambrano E., (2019), "Interface for **ICEINCI-LAB** and new functions", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **24**, (2), 167-199
2. Aguiar R., (2014), *Análisis Matricial de Estructuras*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, cuarta edición, 676 p., Quito.
3. Aguiar R., (2012), *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB*, Centro de Investigaciones Científicas. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, segunda edición, 416 p.
4. García, Ó. R., García, L. M. J., Castelló, L. P., Aparicio, A. G., & Vidal, A. P. (2018). *MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica*. Universidad Miguel Hernández.
5. Mañas Mañas, J. F., & Pinta, M. A. (2018). *Métodos Numéricos para el Análisis Matemático con Matlab*.