

MODELO DINÁMICO Y VERIFICACIÓN SÍSMICA DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO DE MEDIDA TIPO CAPACITIVO

Raúl Ritta, Alejandro Brewer, Guillermo Chiappero, Julio Massa

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611, X5016GCA, Córdoba, Argentina
raul.ritta@gmail.com – alejtulbrewer@gmail.com – guillermochiappero@arnet.com.ar – jmassa@efn.uncor.edu

Palabras clave: Análisis dinámico, Transformador eléctrico de medida, Oscilaciones libres. Verificación sísmica.

Resumen

Una de las etapas del proceso de verificación estructural de un equipo que forma parte de una subestación eléctrica consiste en la calificación sísmica del mismo, pudiendo realizarse siguiendo dos caminos posibles dependiendo de la norma que se desea cumplimentar: *i*) ensayo en mesa vibratoria o *ii*) verificación mediante simulaciones numéricas. En este artículo se desarrolla un modelo para estudiar las características dinámicas de un transformador eléctrico de medida de tipo capacitivo que consiste en una viga con masas concentradas y con una rigidez al giro de la base que representa la flexibilidad del sistema de anclaje. Para perfeccionar el modelo se agregó una calibración mediante un ensayo estático para representar adecuadamente las flexibilidades de las uniones abulonadas de la “viga” entre los aisladores.

Se representa la estructura (el transformador) mediante un modelo simple pero ajustado a la realidad física. A partir del modelo físico se desarrolló el modelo matemático para ser usado en simulaciones numéricas de modo de captar las características dinámicas. Se utilizan varios modelos de masas concentradas de varios grados de libertad dinámicos con el propósito de representar el comportamiento dinámico de un transformador eléctrico de medida tipo capacitivo similar a los que utiliza la industria local; este tipo de transformadores tienen amplio campo de aplicación en centrales eléctricas convencionales y nucleares.

Se presentan resultados correspondientes a modelos muy simples de propiedades uniformes distribuidas que, dadas las características de este tipo de transformadores (viga en voladizo), permiten estimar adecuadamente las frecuencias naturales de los transformadores cuando se hacen estudios preliminares. Analizando los resultados provistos por modelos simplificados se muestra la importancia de modelar correctamente: *i*) la flexibilidad del anclaje al suelo y *ii*) las flexibilidades debidas a las uniones abulonadas entre aisladores. Para validar el modelo usado se compararon las frecuencias naturales del mismo con las obtenidas en un ensayo de oscilaciones libres. Por último mediante una simulación numérica se sometió al modelo del transformador a un sismo de gran intensidad cuya zona de mayor energía se encuentra próxima a la primera frecuencia natural del transformador.

1. Introducción

Los sistemas de generación y distribución de energía eléctrica pueden ser divididos en cinco partes principales: *i*) estaciones de generación de energía; *ii*) sistemas de transmisión de energía, *iii*) sistemas de distribución de energía, *iv*) sistemas de control y adquisición de datos; y, *v*) instalaciones auxiliares. Terremotos pasados han mostrado la alta vulnerabilidad de los diferentes componentes de estos cinco tipos de instalaciones. Algunos de los daños más comunes que se han observado son la rotura de partes cerámicas, caída de transformadores u otros componentes pesados, pérdida de aceite dieléctrico de los aisladores y desplazamientos excesivos de algunos componentes. Estos daños conllevan, en la mayoría de los casos, la falla del equipo y la consecuente interrupción del suministro de energía a la población.

A modo de ejemplo se puede citar el terremoto de Loma Prieta de 1989, ocurrido en la región de la Bahía de San Francisco en California, Estados Unidos, cuya magnitud fue de 6,9 Mw. Ese sismo causó daños a ocho subestaciones eléctricas y provocó la interrupción del servicio de energía en la zona afectada. Fueron fuertemente dañados varios transformadores de corriente, interruptores y descargadores, no así los “*bushings*” y radiadores que sólo sufrieron daños menores [1].

La Figura 1 muestra ejemplos de daños causados por el terremoto de Loma Prieta a interruptores y transformadores de corriente. Este simple ejemplo muestra la necesidad de prevenir los posibles daños en las instalaciones causados por solicitaciones de origen sísmico mediante el estudio de la respuesta sísmica de los diferentes componentes y para ello se deben conocer las principales características dinámicas de los mismos. La manera más simple y efectiva de obtener estos parámetros es mediante ensayos, ya sea en el lugar de fabricación o mejor aún en su lugar de emplazamiento. Una vez determinadas mediante ensayos las propiedades dinámicas del equipo a estudiar, se puede generar un modelo matemático para ser usado en el análisis y la verificación sísmica.



Figura 1: Daños causados en subestaciones por el terremoto de Loma Prieta del año 1989.

En las últimas décadas se realizaron estudios experimentales sobre diversos componentes de subestaciones eléctricas. Hosseini y Hatami realizaron ensayos de vibraciones ambientales y vibraciones libres sobre componentes de una subestación transformadora localizada en el centro de Tehran, Iran [2]. Los ensayos se concretaron una vez instalados los equipos y a pocos días de la puesta en servicio de la subestación. Los equipos ensayados fueron transformadores de corriente, interruptores y descargadores. Los ensayos fueron realizados en dos etapas: primero se llevaron a cabo mediciones de vibración ambiental por períodos de 3 minutos durante las horas del día de mayor tráfico vehicular y luego se realizaron una serie de ensayos de oscilación libre mediante la imposición de un pequeño desplazamiento inicial y la posterior liberación repentina del componente ensayado. Los resultados de ambos conjuntos de ensayos fueron procesados y comparados, mostrando buena correlación, tanto en los valores de frecuencia fundamental de oscilación como en los valores del amortiguamiento.

La calificación sísmica de un equipo que forma parte de una subestación eléctrica puede ser realizada siguiendo dos caminos distintos, dependiendo de la norma que se desea cumplimentar: *i*) ensayo en mesa vibratoria o *ii*) verificación mediante simulaciones numéricas. Stefanov realizó la calificación sísmica analítica y experimental de tres tipos de transformadores eléctricos (de corriente, de tensión y combinado) montados sobre diferentes tipos de estructuras [3]. Los transformadores fueron calificados para la máxima excitación sísmica existente en la República de Bulgaria. La calificación sísmica numérica fue realizada mediante modelos de elementos finitos 3D usando FEMAP y el código STARDINE. Los modelos incluyeron al transformador, la estructura de soporte y el suelo. La calificación mediante ensayo se llevó a cabo por separado para las componentes horizontal y vertical. Los transformadores mantuvieron su integridad estructural durante y luego de los ensayos mecánicos. Los ensayos eléctricos realizados luego de la calificación sísmica, mostraron la integridad funcional de los mismos.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo de masas concentradas que permite estudiar el comportamiento dinámico de un transformador eléctrico de medida capacitivo. El equipo elegido como caso de estudio es fabricado por la empresa local AIT S.A. – ARTECHE. El modelo desarrollado fue validado comparando los valores de las frecuencias naturales calculadas con el mismo con los resultados de un ensayo de oscilaciones libres llevado a cabo en las instalaciones de la empresa fabricante. Por último, mediante una simulación numérica se sometió al modelo del transformador a un sismo de gran intensidad cuya zona de mayor energía se encuentra próxima a la primera frecuencia natural del transformador.

2. Presentación del caso de estudio

2.1. Descripción del transformador

Los transformadores de medida se utilizan para alimentar instrumentos de medición, contadores, relés y otros aparatos análogos. Estos transformadores pueden ser de tensión o corriente. La función de los transformadores de medida es reducir a valores no peligrosos y normalizados las características de tensión e intensidad de una red eléctrica. De esta manera se evita la conexión directa entre los instrumentos y los circuitos de alta tensión, lo que sería peligroso para los operarios. También se evita utilizar instrumentos especiales y caros que son necesarios para medir corrientes intensas.

Dentro de la amplia gama de transformadores de medida, en particular entre los de tensión, están los capacitivos, que básicamente están formados por condensadores en serie alojados en uno o más aisladores cerámicos, impregnados en aceite dieléctrico de alta calidad, formando cada uno de ellos una unidad independiente y herméticamente sellada. A su vez, los aisladores están montados sobre una cuba de acero galvanizado donde se aloja la parte inductiva impregnada en aceite mineral. Esta cuba está herméticamente protegida del ambiente. El conjunto de aisladores más la cuba forman un solo sistema que es fijado a la fundación mediante 4 bulones.

La Figura 2 muestra el transformador capacitivo estudiado en el presente trabajo. Como puede observarse en esa figura, desde el punto de vista estructural, el transformador capacitivo es una estructura muy esbelta, en particular el transformador que se modeló tiene una altura total de 5,5 metros aproximadamente y una sección resistente hueca de 25 cm de diámetro exterior.

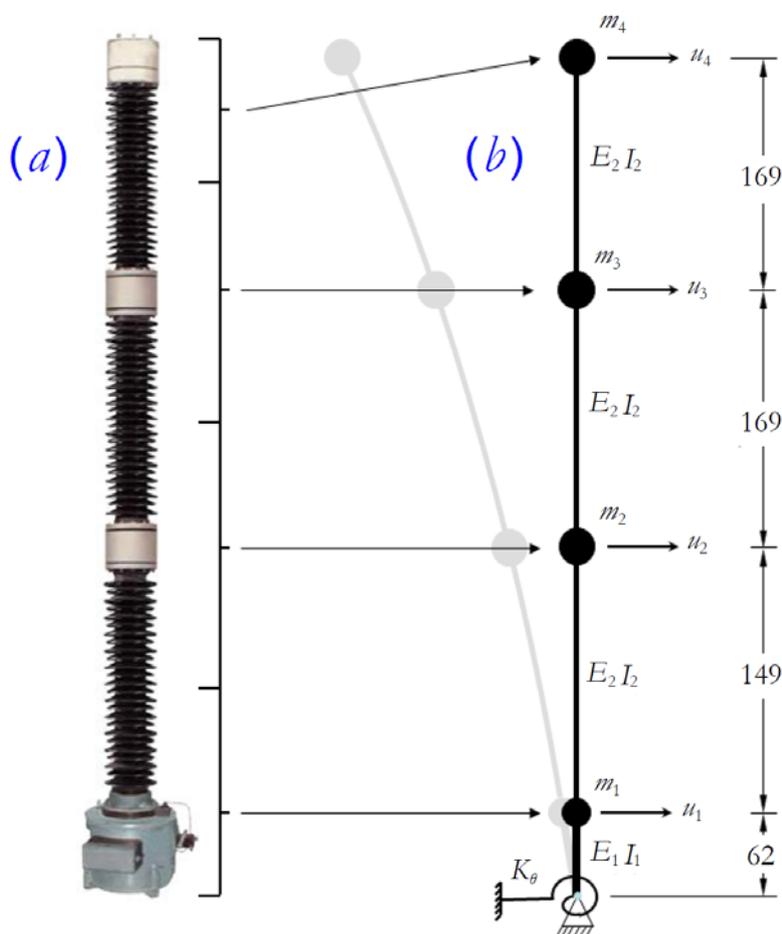


Figura 2: Transformador eléctrico de medida tipo capacitivo. a) Vista en perspectiva y (b) Modelo de masas concentradas.

2.2. Modelo de masas concentradas del transformador

Para estudiar los movimientos horizontales del transformador, se generó un modelo de masas concentradas con un grado de libertad dinámico por masa (el desplazamiento horizontal). La Figura 2 muestra que el anclaje al suelo fue representado por medio de un apoyo que permite el giro más un resorte introducido para tener en cuenta la flexibilidad de la conexión entre el transformador y el suelo. Para calcular la constante de rigidez K_θ se usó un modelo simplificado que contempla la flexibilidad de la unión de la cuba a la cruceta a través de una pestaña, como se muestra en la Figura 3 y la flexibilidad de la unión de la cruceta al suelo como se indica en la Figura 4. A continuación se efectúan los cálculos para determinar la rigidez de cada una de esas uniones: K_{θ_1} para la cuba-cruceta y K_{θ_2} para la cruceta-suelo.

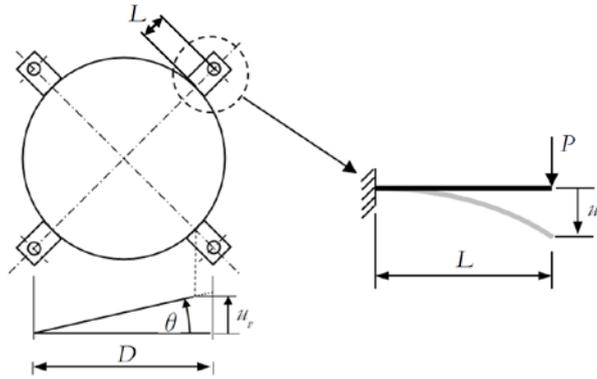


Figura 3: Modelo para el cálculo de la rigidez de la unión cuba-cruceta: K_{θ_1} .

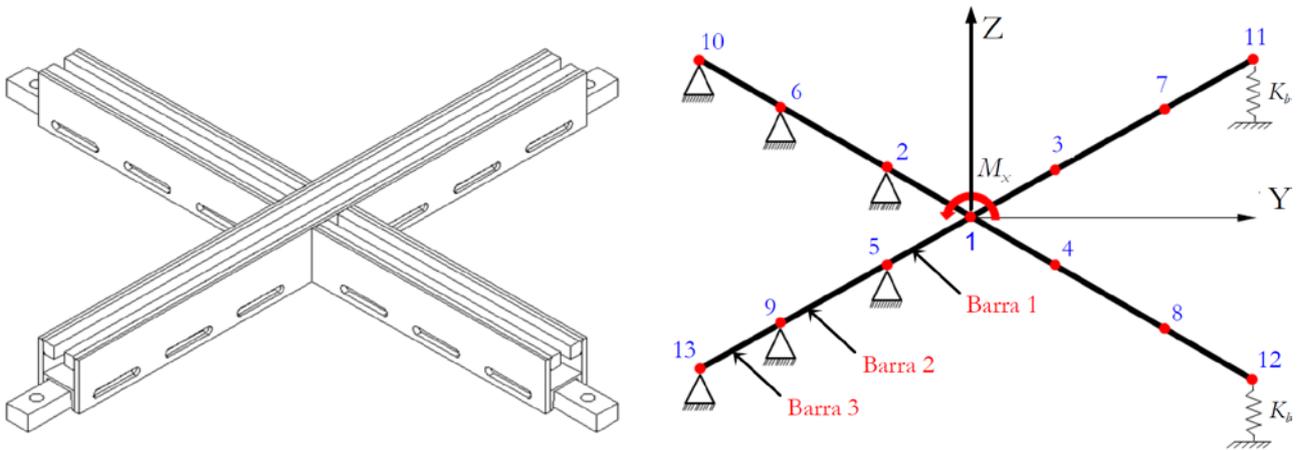


Figura 4: Modelo para el cálculo de la rigidez de la unión cruceta-suelo: K_{θ_2} .

2.2.1 Cálculo de la rigidez K_{θ_1} de la unión de la cuba a la cruceta

El modelo supone que las pestañas inferiores de la cuba, lugar donde se colocan los tornillos de fijación, sufrirán una deformada similar a la de una viga en voladizo (ver Figura 3). Bajo esta suposición y considerando además pequeñas deformaciones y comportamiento elástico lineal del material se tiene:

$$u_r = \frac{PL^3}{3EI} \quad \rightarrow \quad \frac{P}{u_r} = \frac{3EI}{L^3} \quad (1)$$

donde P y u_r son respectivamente la carga y el desplazamiento vertical que se indican en la Figura 3. Los datos de la pestaña de fijación de la cuba son el momento de inercia I , el largo L y del módulo de Young E del material.

Teniendo en cuenta la distancia D entre bulones indicada en la Figura 3 y considerando pequeñas deformaciones, el giro de la base θ se puede aproximar por la tangente, por lo tanto la relación entre el momento M aplicado en la base y el giro θ está dada por,

$$M = 2PD \quad M = K_{\theta_1} \theta \quad \theta = \frac{u_r}{D}, \quad \rightarrow \quad K_{\theta_1} = \frac{2PD^2}{u_r} \quad (2)$$

donde se han tenido en cuenta dos pestañas. Reemplazando la Ecuación (1) en la Ecuación (2), se obtiene el valor de la rigidez al giro de la base K_{θ_1} :

$$K_{\theta_1} = \frac{6EI}{L^3} D^2 \quad (3)$$

La Tabla 1 muestra las propiedades mecánicas y geométricas de las pestañas, así como el valor de la rigidez al giro de la base que aportan estos elementos.

Tabla 1: Propiedades de las pestañas de fijación de la cuba a la cruceta.

E [Kg/cm ²]	I [cm ⁴]	L [cm]	D [cm]	K_{θ_1} [Kg-cm/rad]
$2,1 \times 10^6$	0,5	4	45	$1,99 \times 10^8$

2.2.2 Cálculo de la rigidez K_{θ_2} de la unión de la cruceta al suelo

Para calcular la rigidez de la cruceta sobre la que fue montada el transformador se usó el Programa Grilla [4] y el modelo de barras de la Figura 4. Los bastones de acero de 64 cm que vinculan la cruceta con la fundación (losa reactiva), se modelaron con un resorte lineal de rigidez $K_b = AE/L$, donde A es el área de la sección transversal del bastón, E el módulo de Young del material y L la longitud del mismo. Los apoyos de segunda especie en los nudos 2, 5, 6 y 9 tienen como propósito impedir el desplazamiento vertical hacia abajo de dichos nudos debido a la acción de un momento M_x antihorario en la dirección del eje x aplicado en el nudo 1 (ver Figura 4). La rigidez de la cruceta al giro se calcula como:

$$K_{\theta_2} = \frac{M_x}{\theta_x} \quad (4)$$

La Tabla 2 muestra las propiedades mecánicas y geométricas de los bastones y en la Tabla 3 se dan las propiedades de las distintas barras de la cruceta (J_R es la rigidez a torsión) y la rigidez K_{θ_2} calculada con la Ecuación (4).

Tabla 2: Propiedades de los bastones que unen la cruceta al suelo.

E [Kg/cm ²]	A [cm ²]	L [cm]	K_b [Kg/cm]
2,1 x 10 ⁶	4,91	63,9	1,613 x 10 ⁵

Tabla 3: Propiedades de la cruceta.

	E [Kg/cm ²]	A [cm ²]	I [cm ⁴]	J_R [cm ⁴]	L [cm]	K_{θ_2} [Kg-cm/rad]
Barra 1	2,1 x 10 ⁶	57,68	792,7	34,7	31,8	1,09 x 10 ⁸
Barra 2	2,1 x 10 ⁶	57,68	792,7	34,7	21,9	
Barra 3	2,1 x 10 ⁶	21,06	26,7	59,5	17,0	

2.2.3 Cálculo de la rigidez al giro K_{θ} de la base del transformador

Sumando el aporte de flexibilidad de las dos uniones mencionadas (cuba-cruceta y cruceta-suelo) se puede obtener la rigidez equivalente K_{θ} del conjunto de la siguiente manera:

$$\frac{1}{K_{\theta}} = \frac{1}{K_{\theta_1}} + \frac{1}{K_{\theta_2}} \quad \Rightarrow \quad K_{\theta} = \frac{K_{\theta_1} K_{\theta_2}}{K_{\theta_1} + K_{\theta_2}} = 7,07 \times 10^7 \text{ Kg-cm/rad} \quad (5)$$

2.2.4 Propiedades mecánicas y geométricas de los componentes del transformador

Como se comentó anteriormente, este tipo de transformadores está formado por una cuba inferior de acero inoxidable y varios módulos de aisladores de cerámica vinculados entre sí a través de uniones abulonadas. La Tabla 4 muestra las propiedades mecánicas de los distintos componentes del modelo.

Tabla 4: Propiedades de los elementos componentes del modelo de viga.

	Peso [Kg]	A [cm ²]	I [cm ⁴]	E [Kg/cm ²]
Módulo capacitivo	258	142,5	8389	6,1 x 10 ⁵
Cuba inferior	268	69,6	427357	2,1 x 10 ⁶

Para tener en cuenta los aportes de flexibilidad de las distintas uniones abulonadas que conectan los módulos capacitivos (ver nudos 1, 2, 3 y 4 en la Figura 8), se realizó un ensayo estático donde se midió la deflexión del transformador. Esto permitió calibrar el modelo de viga ajustando la rigidez flexional afectándola de un coeficiente α .

En la Figura 5, que muestra un esquema del ensayo realizado, se ha indicado la componente del desplazamiento debido a la rotación en la base, u_1 , la correspondiente a la flexión, u_2 , y el desplazamiento total, u_t , que es la suma de los dos desplazamientos anteriores:

$$u_t = u_1 + u_2 = \theta L + \frac{PL^3}{3EI} = \frac{PL}{K_{\theta}} L + \frac{PL^3}{3EI} \quad (6)$$

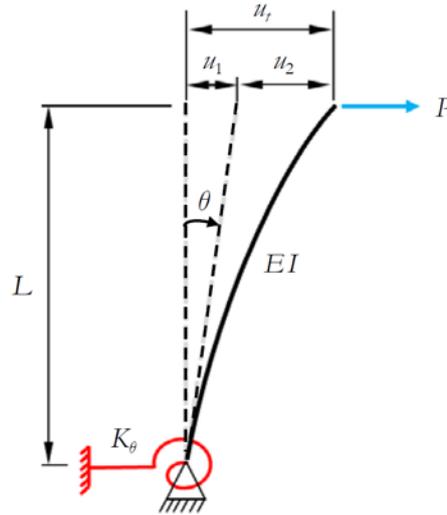


Figura 5: Esquema del ensayo de deflexión estática del transformador.

La Tabla 5 resume los datos y resultados obtenidos en el ensayo estático y el valor del coeficiente α .

Tabla 5: Datos y resultados del ensayo de deflexión estática para calcular α .

L [cm]	P [Kg]	u_m [cm]	K_θ [Kg-cm/rad]	EI [Kg-cm ²]	α
521	129	2,10	$7,07 \times 10^7$	$5,131 \times 10^9$	0,7374

Para la calibración del modelo se comparó el desplazamiento total medido u_m con el calculado y se afectó al módulo elástico E de la porcelana por un factor α , como se muestra en la Ecuación (7):

$$u_m = \frac{PL^2}{K_\theta} + \frac{PL^3}{3\alpha EI} \Rightarrow \alpha = \frac{PL^3}{3EI(u_m - PL^2/K_\theta)} \quad (7)$$

2.3. Cálculo de modos y frecuencias naturales

La ecuación de movimiento del modelo de la Figura 2b es [5]:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K_c u = 0 \quad (8)$$

donde M es la matriz de masa, C es la matriz de amortiguamiento viscoso, K_c la matriz de rigidez condensada, u es el vector de desplazamientos y el punto sobre una variable significa derivación respecto del tiempo. Para calcular las frecuencias naturales y modos, se resuelve el problema de valores y vectores propios,

$$(K_c - \lambda_i M) \varphi_i = 0 \Rightarrow \det(K_c - \lambda_i M) = 0 \quad (9)$$

donde $\lambda_i = \omega_i^2$, siendo ω_i la i -ésima frecuencia natural del sistema.

El modelo de la Figura 2b, que denominaremos *Modelo 3*, sólo tiene 4 grados de libertad dinámicos porque se han condensado los giros. Para el cálculo de las columnas de la matriz de rigidez condensada K_c se utilizó el programa PORTI [6] y los datos de la Tabla 4. En la Ecuación (10) se muestran la matriz de masas concentradas y la matriz de rigidez condensada del sistema considerando el aporte de la flexibilidad del sistema de anclaje y el coeficiente α que modifica el módulo de elasticidad E de la porcelana (Modelo 3).

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0,268 & 0 & 0 & 0 \\ & 0,263 & 0 & 0 \\ & & 0,263 & 0 \\ & & & \text{Simétrica} & 0,158 \end{bmatrix} \quad K_{c_3} = \begin{bmatrix} 63294 & -21705 & 5718 & -902 \\ & 15908 & -8218 & 2080 \\ & & 7617 & -2769 \\ & & & \text{Simétrica} & 1221 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Las frecuencias naturales y sus respectivos modos se muestran en la Tabla 6, allí puede observarse que el transformador tiene un modo predominante cuya frecuencia es de 2,62 Hz, mientras que los modos superiores tienen frecuencias que están bastante separadas de la fundamental.

La Figura 6 muestra los cuatro modos, asociado a los desplazamientos horizontales, del transformador. Notar que la deformada del primer tramo de todos los modos es una línea recta porque ese tramo modela la cuba que tiene una rigidez flexional muy alta. La pendiente de ese tramo corresponde al giro de la base.

Tabla 6: Frecuencias y modos naturales del Modelo 3

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
f [rad/seg]	16,46	90,03	228,45	522,28
f [Hz]	2,62	14,33	36,36	83,12
T [seg]	0,3818	0,0697	0,0275	0,0120
u_1	0,0377	-0,2641	-0,5272	1,0000
u_2	0,2208	-0,9577	-0,9094	-0,4119
u_3	0,5790	-0,6548	1,0000	0,1442
u_4	1,0000	1,0000	-0,5958	-0,0515

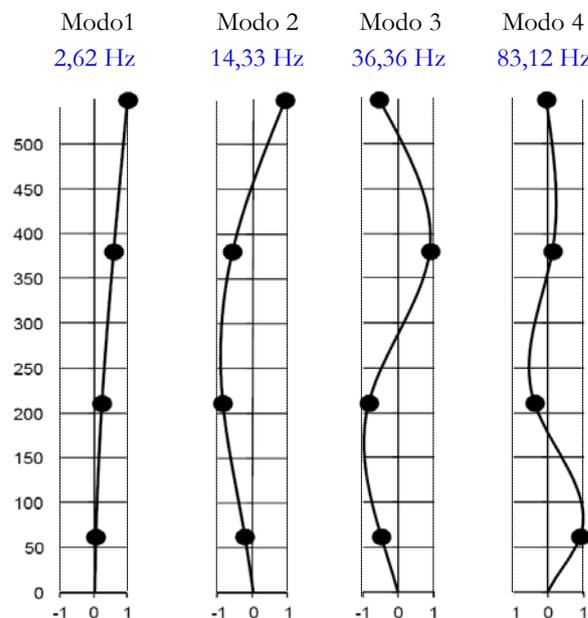


Figura 6: Modos naturales de vibración del Modelo 3

2.4. Resultados obtenidos con otros modelos

Con el propósito de mostrar el efecto del aporte de flexibilidad del sistema de anclaje (K_θ) y de la flexibilidad calibrada (α) de la viga a partir del ensayo de deflexión estática, a continuación se comparan los resultados obtenidos con otros dos modelos: Modelo 1 ($K_\theta = \infty$, $\alpha = 1$), base empotrada; Modelo 2 ($K_\theta = 7,07 \times 10^7$, $\alpha = 1$), base flexible; Modelo 3 ($K_\theta = 7,07 \times 10^7$, $\alpha = 0,7374$) modelo completo desarrollado en las subsecciones 2.2 y 2.3.

Matriz de Rigidez del Modelo 1

$$K_{c_1} = \begin{bmatrix} 443308 & -14582 & 4833 & -762 \\ & 21964 & -11217 & 2831 \\ & & 10336 & -3755 \\ & & & \text{Simétrica} & 1655 \end{bmatrix}$$

Matriz de Rigidez del Modelo 2

$$K_{c_2} = \begin{bmatrix} 78555 & -29019 & 7670 & -1209 \\ & 21393 & -11104 & 2813 \\ & & 10314 & -3751 \\ & & & \text{Simétrica} & 1654 \end{bmatrix} \quad (11)$$

La primera frecuencia del *Modelo 1* es 3,81 Hz, la del *Modelo 2* es 2,87 Hz mientras que la del *Modelo 3* es 2,62 (ver Tabla 7). El valor de las restantes frecuencias también se muestra en la Tabla 7. Notar que al tener los *Modelos 1* y *2* menor flexibilidad que el *Modelo 3*, sus frecuencias naturales resultan mayores.

2.5. Resultados obtenidos con modelos simplificados de propiedades distribuidas

Como la mayor parte de la “viga en flexión” que modela al transformador está constituida por los elementos aislantes (notar que la parte correspondiente a la cuba, que es diferente, está en la zona inferior donde los desplazamientos son menores), se puede obtener buenos resultados con un modelo de propiedades distribuidas uniformemente a lo largo de la viga.

Las frecuencias naturales de vibración de una viga uniforme con un extremo libre y otro articulado donde actúa un resorte torsional se encuentran tabuladas. Las Tablas de Blevins [7] proveen, en función del cociente $[K_\theta L / (EI)]$, el valor λ_i que permite calcular la frecuencia natural de orden ‘i’ usando la Ecuación (12). En esa ecuación L , E , I y m son respectivamente el largo, el módulo de Young, el momento de inercia y la masa por unidad de longitud de la viga, K_θ es la rigidez del resorte. El esquema del modelo de propiedades uniformemente distribuidas, los datos y la fórmula utilizada se muestran en la Figura 7.

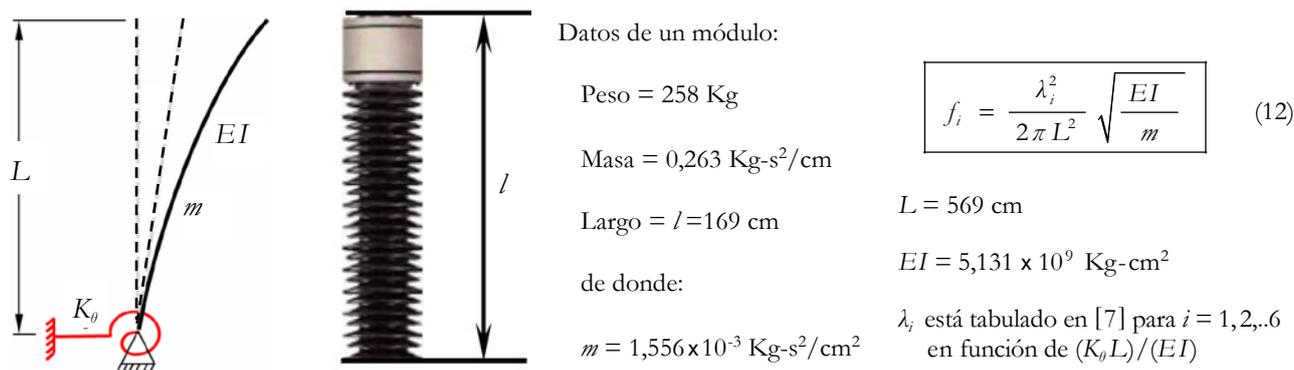


Figura 7: Esquema del modelo de propiedades uniformemente distribuidas – Datos y fórmula utilizada.

La Tabla 7 contiene las cuatro frecuencias naturales correspondientes a los tres modelos de masas concentradas y a los tres modelos asociados de propiedades constantes distribuidas. Notar que dadas las características del transformador el método simplificado de propiedades distribuidas provee resultados aceptables para estimar las frecuencias naturales.

Tabla 7: Frecuencias naturales para los diversos modelos de masas distribuidas y concentradas.

Modelo	K_θ	α	Modelos de masas y rigideces distribuidas uniformemente				Modelos de masas concentradas							
			λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	∞	1	1,875	4,694	7,855	10,996	3,14	19,67	55,08	107,93	3,81	21,73	53,24	106,11
2	$7,07 \times 10^7$	1	1,707	4,384	7,435	10,505	2,60	17,16	49,34	98,52	2,87	15,97	41,41	93,63
3	$7,07 \times 10^7$	0,7374	1,727	4,404	7,455	10,524	2,29	14,87	42,61	84,90	2,62	14,33	36,36	83,12

3. Ensayo de oscilaciones libres

Con el propósito de validar el Modelo 3 del transformador desarrollado en la sección 2, se realizó un ensayo de oscilaciones libres. Para eso se utilizaron las instalaciones y el instrumental que la empresa AIT S.A. – ARTECHE dispone para tal fin. Como instrumento de medición se empleó un acelerómetro triaxial el cual fue ubicado en el centro de gravedad del transformador y como instrumento de grabación se utilizó un osciloscopio. El ensayo consistió en la aplicación de un desplazamiento inicial al transformador y la posterior liberación repentina del mismo para dar comienzo a la oscilación libre.

Antes de realizar el ensayo de oscilación libre se realizó el ensayo de flexión estática y se midió el desplazamiento de la punta del transformador (2,1 cm) donde se aplicó una carga de 129 Kg que fue medida mediante una celda de carga (ver Figura 8). Este ensayo permitió calibrar el modelo mediante el factor α definido en la Ecuación (7). La última columna de la Tabla 5 muestra el resultado obtenido para α .

La Figura 8 muestra el transformador instantes previos al ensayo de oscilaciones libres. Como muestra la fotografía, el extremo superior del transformador fue desplazado 2,1 cm de su posición de equilibrio mediante la aplicación de una carga (129 Kg). La máxima tensión en la porcelana al inicio de las vibraciones libres fue de 88 Kg/cm², mientras que la tensión de rotura es 280 Kg/cm².

La Figura 9 muestra el historial de aceleraciones de la componente horizontal en la dirección ensayada, en la Figura 9a se muestra el registro original y en la Figura 9b el registro luego de ser filtrado mediante un filtro pasa bajo de Butterworth con una frecuencia de corte de 20 Hz, diseñado mediante la herramienta “Filter Design and Analysis Tool” de Matlab.

La Figura 10 muestra la transformada rápida de Fourier del registro de aceleraciones donde se indica el valor de la frecuencia fundamental del transformador (2,50 Hz). Si comparamos ese valor obtenido del ensayo de oscilaciones libres con el calculado para el primer modo, a partir del Modelo 3 (2,62 Hz) podemos concluir que ese modelo representa bastante bien el comportamiento real del transformador, lo que valida al modelo para ser utilizado en simulaciones numéricas para verificar la estructura del transformador. En la Figura 10 también se observa la frecuencia propia de la cuba de 19,1 Hz que no corresponde a una frecuencia natural del Modelo 3 del transformador. Mediante el método del decremento logarítmico, se obtuvo el valor del amortiguamiento ($\zeta = 1,96 \%$) como se indica en la Figura 11.



Figura 8: Disposición del transformador en el ensayo de oscilaciones libres.

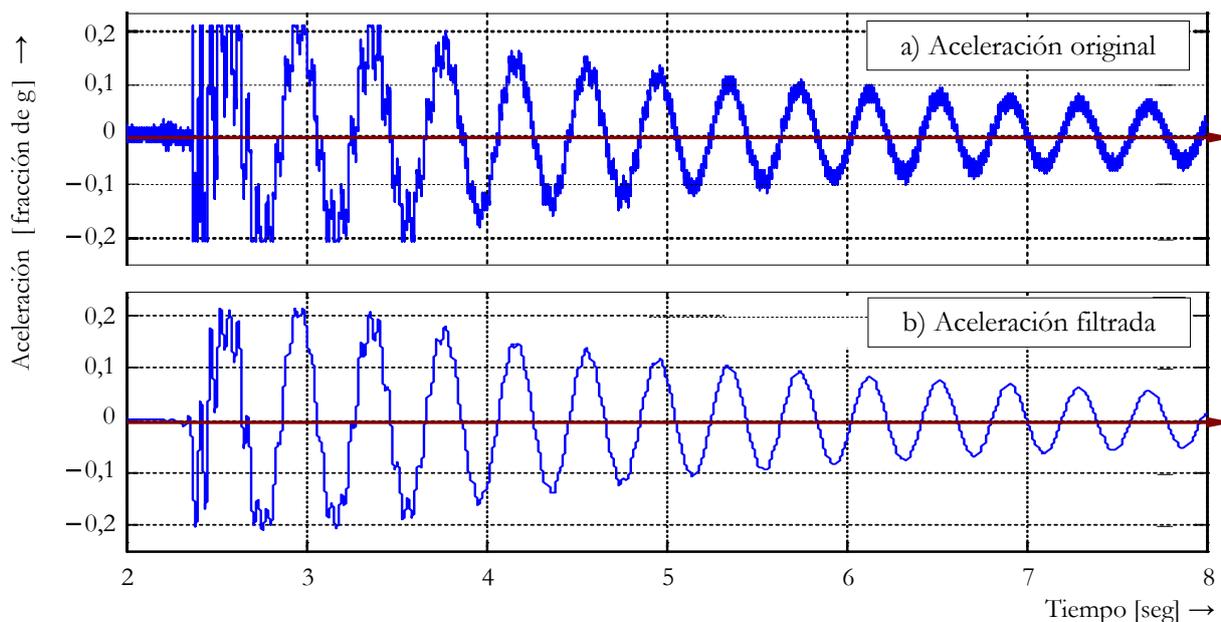


Figura 9: Aceleraciones medidas durante el ensayo de oscilación libre: a) valores originales y b) filtrados.

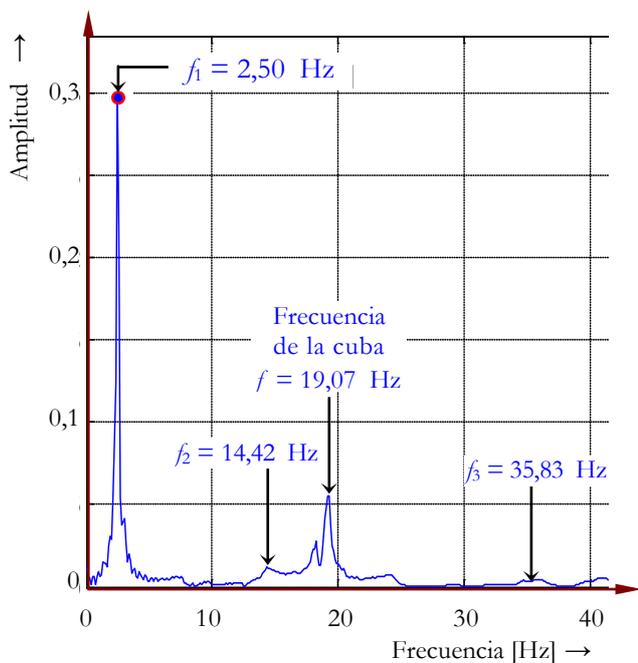


Figura 10: Transformada rápida de Fourier del registro de aceleraciones.

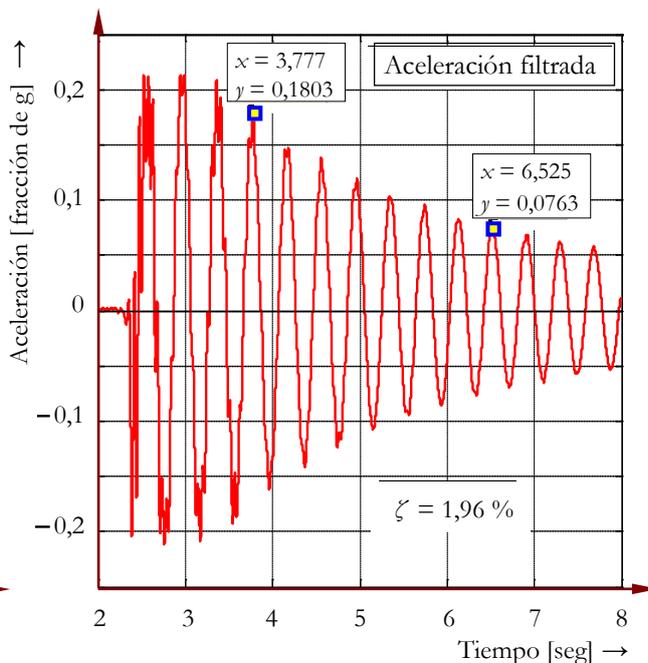


Figura 11: Cálculo de la razón de amortiguamiento del transformador.

4. Respuesta del transformador sometido a un terremoto

A continuación se calculó la respuesta del transformador a un terremoto. El terremoto escogido fue el registrado en una subestación de El Centro, California, Estados Unidos, durante el terremoto de Imperial Valley del 18 de Mayo de 1940 que tuvo una magnitud de 6,9 y una intensidad máxima percibida de X (intenso) en la escala de Mercalli. La Figura 12 muestra el historial de aceleraciones, mientras que la Figura 13 muestra la transformada de Fourier del mismo. Como puede observarse de esta última figura, el terremoto tiene la zona de mayor energía próxima a los 2,5 Hz y es por este motivo que fue escogido para realizar el estudio sísmico de nuestro transformador. Utilizando descomposición modal, las ecuaciones de movimiento de los sistemas de un grado de libertad fueron integradas numéricamente mediante la solución recursiva de la integral de Duhamel [8]. Para ello se adoptó un modelo de amortiguamiento viscoso lineal y como coeficiente de amortiguamiento se usó el obtenido en el ensayo de oscilación libre.

La Figura 14 muestra el historial de desplazamientos horizontales de los nudos 3 y 4. El desplazamiento máximo del transformador en su parte superior es de 4,28 cm (nudo 4). Es muy importante conocer ese valor a la hora de definir las longitudes de los conductores de conexión entre los diferentes equipos y evitar así cargas adicionales por la interacción entre ellos. La máxima tensión en la porcelana durante el sismo fue de 219 Kg/cm², valor inferior a la tensión de rotura (280 Kg/cm²).

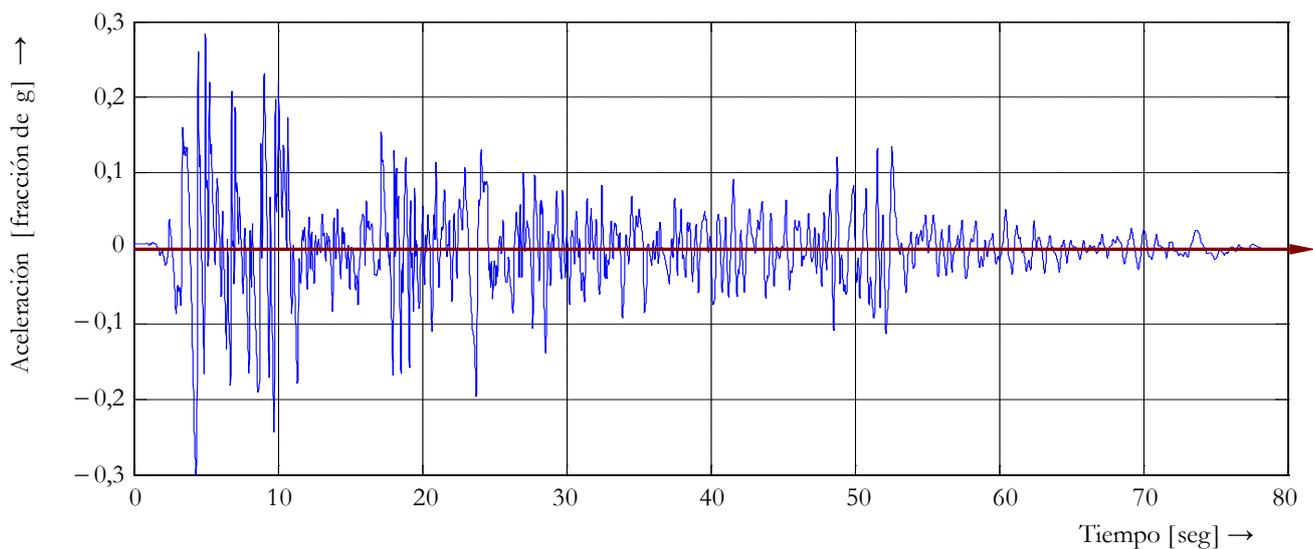


Figura 12: Acelerograma del movimiento del suelo durante el terremoto de “El Centro”.

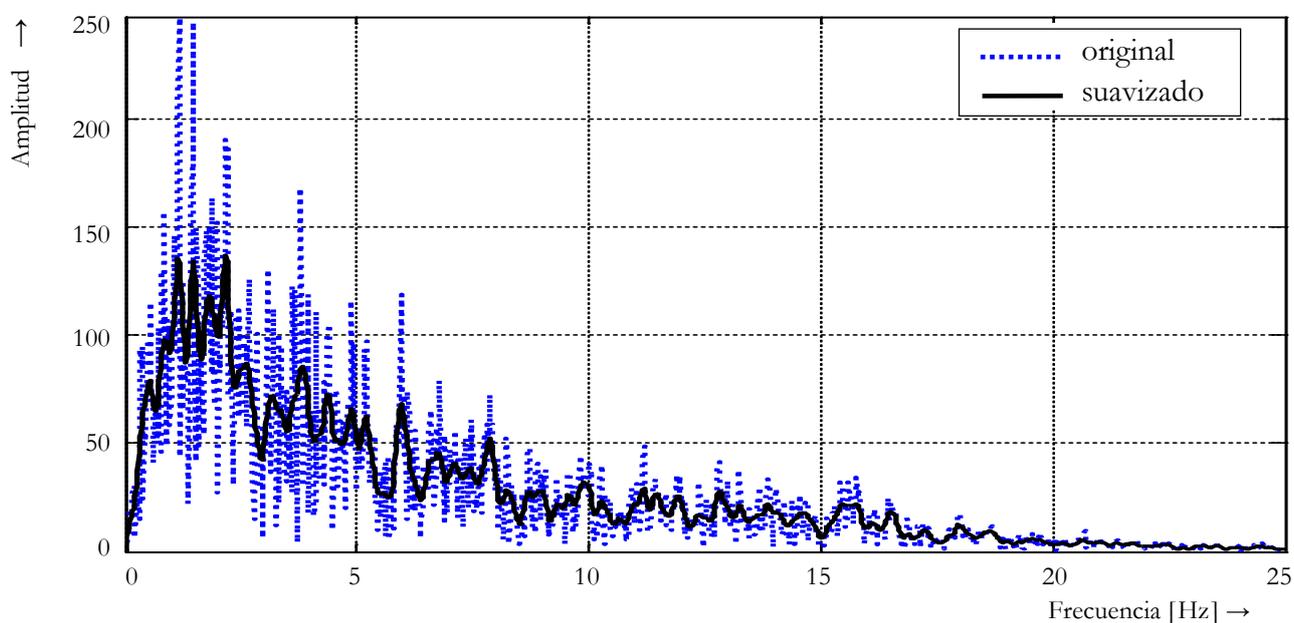


Figura 13: Espectro de Fourier del registro del terremoto de “El Centro”.

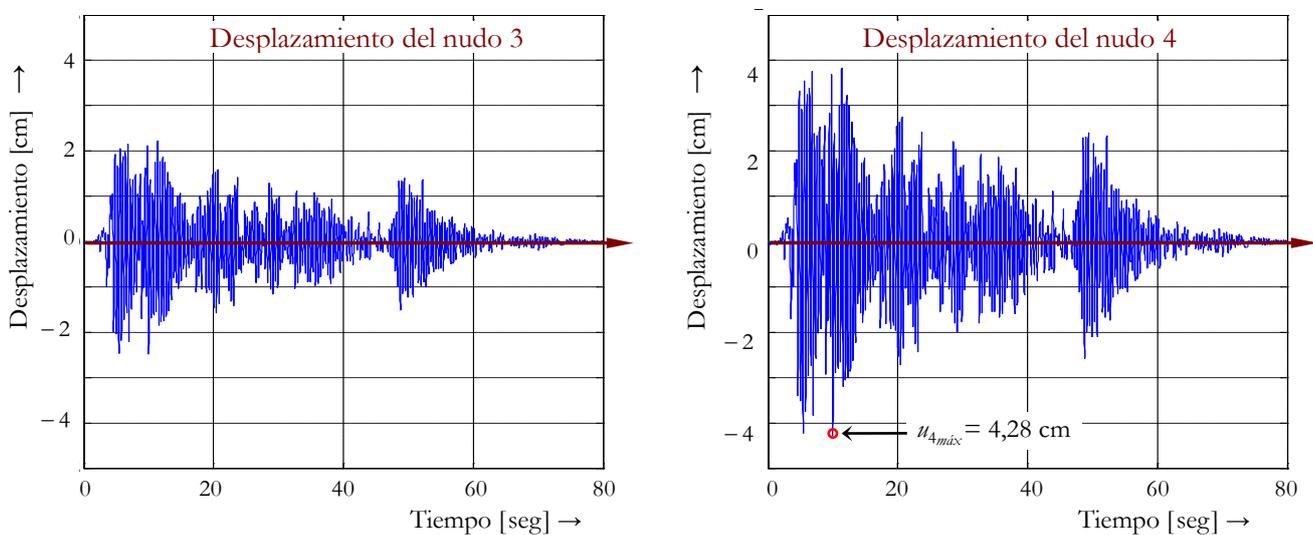


Figura 14: Historial de los desplazamientos horizontales de los nudos 3 y 4.

5. Conclusiones

Se desarrolló un modelo para estudiar las características dinámicas de un transformador eléctrico de medida de tipo capacitivo que consiste en una viga en voladizo con masas concentradas con una rigidez al giro de la base que representa la flexibilidad del sistema de anclaje. Para perfeccionar el modelo se agregó una calibración mediante un ensayo estático para representar adecuadamente las flexibilidades de las uniones abulonadas de la “viga” entre los aisladores.

Comparando las frecuencias naturales calculadas con el modelo aquí propuesto, con las frecuencias medidas durante un ensayo de vibraciones libres se pudo demostrar la capacidad del modelo de predecir adecuadamente el comportamiento dinámico. Analizando los resultados provistos por modelos simplificados se comprobó que es muy importante modelar correctamente: *i*) la flexibilidad del anclaje al suelo y *ii*) las flexibilidades debidas a las uniones abulonadas entre aisladores.

Se presentaron resultados correspondientes a modelos muy simples de propiedades uniformes distribuidas que, dadas las características de este tipo de transformadores (viga en voladizo), permiten estimar adecuadamente las frecuencias naturales de los transformadores cuando se hacen estudios preliminares.

Por último mediante una simulación numérica se sometió al modelo del transformador a un sismo de gran intensidad cuya zona de mayor energía se encuentra próxima a la primera frecuencia natural del transformador y se comprobó que el equipo puede soportarlo sin sufrir daños.

Referencias

- [1] U.S. Geological Survey. “The Loma Prieta, California, earthquake of october 17, 1989 – Lifelines”. U.S. Geological Survey Professional paper 1552-A. Unites States Government Printing Office, Washington, 1998.
- [2] Mahmood, Hosseini; Mehran, Hatami. “Identification of the dynamic characteristics of substation components by ambient and free vibration tests”. 16th Conference in Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-16). Washington DC, USA, 2001.
- [3] Dimitar, Stefanov. “Analytical and experimental seismic qualification of three types of electric transformers”. 19th Conference in Structural Mechanics in Reactor Technology Toronto, Canada, 2007.
- [4] Massa, Julio C., Programa Grilla: Manual del Usuario, Departamento de Estructuras, F.C.E.F.yN. U.N.C., http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/estruct/calculo_1/SOFT_CEL.HTM, 2004.
- [5] Meirovith, Leonard. *Computational Methods in Structural Dynamics*, Springer, 1980.
- [6] Massa, Julio C. Programa Porti: Manual del Usuario, Departamento de Estructuras, F.C.E.F.yN. U.N.C., http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/estruct/calculo_1/SOFT_CEL.HTM, 2004.
- [7] Blevins, R. *Formulas for Natural Frequency and Mode Shapes*, Krieger Publishing, Melbourne, Florida, USA, 2001.
- [8] Chopra, Anil K. *Dynamics of Structures*. Upper Saddle River, NJ. Prentice-Hall, 1995.