



## **INSTRUMENTACIÓN DE EQUIPOS DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS: ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES POR OPERACIÓN Y VIBRACIÓN FORZADA**

**Roberto A. Ruedas Medina<sup>1</sup>, Ulises Mena Hernández<sup>1</sup>, Hans I. Archundia Aranda<sup>1</sup>, Nava  
Tristán Oliver E.<sup>2</sup> y Tena Coluga Arturo<sup>3</sup>**

### **RESUMEN**

Se presentan los resultados obtenidos de la instrumentación en equipos menores de subestaciones eléctricas de la costa pacífico del país. Las mediciones fueron utilizadas para determinar las propiedades dinámicas de los equipos, así como los niveles de vibración a los que encuentran sometidos durante la operación de la subestación. De las pruebas en equipo no energizado se calcularon el porcentaje del amortiguamiento crítico y la frecuencia fundamental de vibración. Se encontró un rango del porcentaje de amortiguamiento y frecuencias fundamentales para los equipos eléctricos estudiados.

### **ABSTRACT**

This paper presents the results of electrical equipment instrumentation of Mexican pacific coast substations. The measurements were employed to calculate the dynamic properties of electric equipment and vibration level during operation. From non energized equipment test, percentage of critical damping and fundamental frequency was calculated. It was observed a range of percentage of critical damping and fundamental frequency of electric equipment analyzed.

### **INTRODUCCIÓN**

Con la finalidad de conocer el comportamiento estructural del sistema equipo eléctrico-estructura de soporte-cimentación, se elaboró un programa de instrumentación de equipos de subestaciones eléctricas. Para ello, se instrumentó equipo no energizado y energizado. Los equipos instrumentados corresponde a cuatro subestaciones ubicadas en la costa del Pacífico (dos en el estado de Colima y dos en el estados de Guerrero). Las pruebas en el equipo no energizado tuvieron la finalidad de determinar las propiedades dinámicas del sistema con fines de análisis sísmico (Archundia, 2009; IIE, 2010). Por otra parte, las pruebas en el equipo energizado permitieron conocer el nivel de las vibraciones a las que se encuentra sometida la estructura de soporte y la cimentación debido a la excitación eléctrica de los componentes electromecánicos y electromagnéticos de estos equipos.

### **METODOLOGÍA**

Con base en un análisis previo de discretización de modelos con características similares, se instalaron tres acelerómetros a distintas alturas en los equipos eléctricos respetando un eje de referencia tridimensional global. En todos los casos la orientación de los ejes fue como la indicada en la figura 3: dirección X, horizontal paralela a la línea de conducción eléctrica; dirección Y, horizontal y perpendicular a la dirección X;

---

<sup>1</sup> Investigador, Instituto de Investigaciones Eléctricas, c/ Reforma No. 113, Colonia Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos. Teléfono 777 3623811; [roberto.ruedas@iie.org.mx](mailto:roberto.ruedas@iie.org.mx), [umena@iie.org.mx](mailto:umena@iie.org.mx), [hans.archundia@iie.org.mx](mailto:hans.archundia@iie.org.mx).

<sup>2</sup> Investigador, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, CFE, Augusto Rodin No.265 ,Colonia Nochebuena, C.P. , México, D.F.

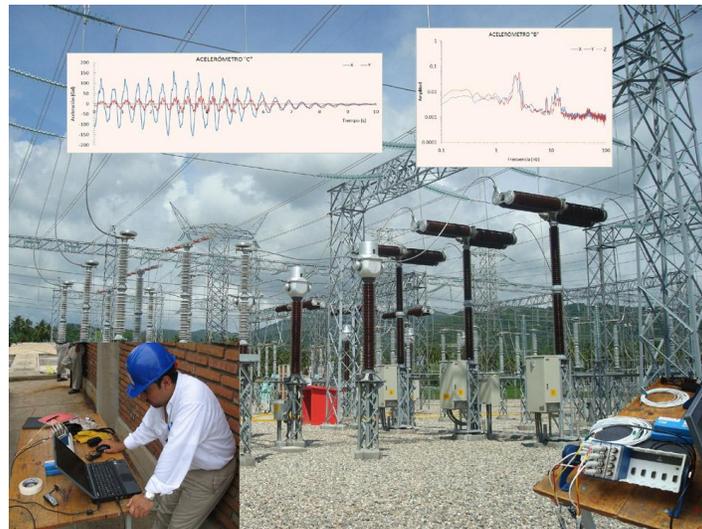
<sup>3</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Azcapotzalco, Departamento de Materiales, Av. San Pablo # 180, 02200 México, DF; [atc@correo.azc.uam.mx](mailto:atc@correo.azc.uam.mx).

dirección Z, vertical. Los acelerómetros utilizados fueron triaxiales (tipo Piezoeléctrico) con un intervalo de trabajo de  $\pm 5g$ , 1 a 3000 Hz y con sensibilidad de 1 mg.

Se estudiaron tres tipos de excitación a) vibración por operación, b) jalón cíclico y c) jalar y soltar (“jalón simple”). Las señales se sometieron a un tratamiento estándar en el dominio del tiempo y de la frecuencia para obtener las propiedades dinámicas fundamentales del sistema (frecuencia fundamental y amortiguamiento).

### EQUIPO ENERGIZADO

Se midió la vibración por operación en equipos eléctricos energizados tales como transformadores de potencia (TP), transformadores de corriente (TC) e interruptores (INT). Las señales medidas corresponden únicamente a la vibración por operación de los equipos (figura 1).



**Figura 1** Subestaciones eléctricas instrumentadas

En los transformadores de potencia se colocaron dos acelerómetros. El primero de ellos se colocó muy cercano a la base del cuerpo del transformador. El segundo acelerómetro fue colocado en los radiadores, sobre los rieles, sobre el muro de apoyo del transformador y en distintos puntos del cuerpo del mismo. Para cada medición se obtuvieron los registros del primer acelerómetro en la base y los registros del segundo acelerómetro en distintas posiciones, figura 2.



**Figura 2** Colocación de acelerómetros en la base y sobre el riel de un Transformador de Potencia



Dado que los equipos estaban energizados y por razones de seguridad, en los TC y los INT sólo fue posible colocar los acelerómetros a distintas alturas del pedestal del equipo.

El procesamiento de las señales consistió en obtener los espectros de Fourier para conocer las frecuencias de vibración predominantes, así como la magnitud de la aceleración.

### EQUIPO NO ENERGIZADO

Se realizaron mediciones de vibración en los siguientes equipos no energizados: interruptores (INT), transformadores de corriente (TC) y cuchillas (CUCH). En la figura 3 se ilustra la colocación los acelerómetros en un transformador de corriente, un interruptor y una cuchilla. En cada equipo no energizado se instalaron 3 acelerómetros. En la misma figura se puede observar que en la cuchilla sólo se instrumentó un aislador. En todas las pruebas, el acelerómetro A se colocó en la unión de la base del equipo con el pedestal, mientras que el acelerómetro C se colocó lo más alto que fue posible. El acelerómetro B fue colocado en una altura intermedia.



**Figura 3 Instalación de acelerómetros en equipo eléctrico no energizado**

La excitación de jalar y soltar consistió en atar una cuerda alrededor de la base del equipo eléctrico y aplicar una tensión de aproximadamente 600-800kN (60 - 80 kgf). La tensión aplicada se midió con un par de dinamómetros (ver figura 4). La cuerda formaba un ángulo de aproximadamente 15° con la horizontal. El objetivo de jalar y soltar fue desplazar horizontalmente el pedestal del equipo para luego liberarlo súbitamente y provocar una vibración libre del sistema pedestal-equipos eléctricos. La señal se comenzó a registrar cuando ya se había aplicado tensión a la cuerda y aproximadamente 5 segundos antes de liberarla. De esta forma en la señal grabada se pudo identificar claramente el momento en que el equipo comienza a vibrar libremente. Se realizaron pruebas por separado aplicando la excitación de jalar y soltar primero en la dirección X y luego en la dirección Y.

En la prueba de “jalón cíclico” se empleó la misma configuración de la cuerda atada a la base del equipo eléctrico, pero ahora con la aplicación de tensiones en forma cíclica con periodo de entre 0.4 y 0.5 segundos. Aproximadamente los primeros 5 segundos de la señal contienen el registro de los “jalones cíclicos”. También se realizaron pruebas aplicando “jalones cíclicos” en las direcciones X y Y. Las mayores aceleraciones y desplazamientos se alcanzaron con el jalón cíclico.

La duración de los registros es de 60 segundos con un paso de 0.0006 s, tanto para excitación instantánea como para excitación cíclica.



**Figura 4 a) Excitación de los equipos no energizados con “jalar y soltar” y “jalón cíclico” y b) dinamómetros empleados para medir la tensión aplicada**

## DIEZMADO DE SEÑALES

Los registros fueron sujetos a un proceso de diezmado de tipo lineal con un paso de 0.005 s. Con este paso y de acuerdo con el teorema de muestreo de Nyquist la señal diezmada contiene información suficiente para reproducir señales con frecuencias de hasta 100 Hz.

## RECORTE DE SEÑALES

La determinación de las propiedades dinámicas fundamentales se efectuó con la parte de la señal que contiene solo vibración libre. La señal anterior al instante en que comienza la vibración libre fue recortada. Como ejemplo, en la figura 5 ilustra el punto a partir del cual se realiza el recorte de las señales de los acelerómetros A, B y C medidas en la dirección Y de un TC.

## FILTRADO DE SEÑALES

A la señal diezmada y recortada se le aplica un filtro pasa altas con frecuencia de corte de 1 Hz. El filtro empleado fue de tipo Butterworth, de orden 2. El objetivo del filtro fue reducir la amplitud de las frecuencias menores a 1 Hz para que la frecuencia fundamental adquiera mayor predominancia dentro del espectro de Fourier y sea más fácil su identificación. La figura 6 contiene la misma señal de la figura 5 después de haber sido recortada y filtrada. En algunos casos la señal filtrada no definía claramente el decaimiento logarítmico por amortiguamiento debido a que las señales de alta frecuencia distorsionaban la señal. Considerando que las frecuencias menor y mayor de la meseta del espectro de diseño definido por CALSISEE (IIE, 2005) son 0.8 Hz y 8 Hz, se aplicó un filtro pasabanda con límites inferior y superior de 1 y 8 Hz.

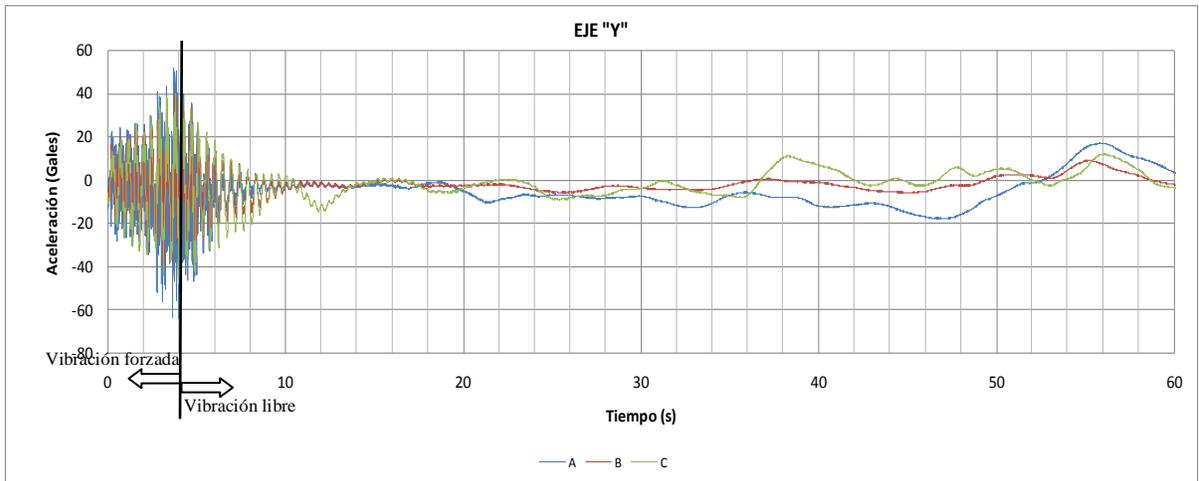


Figura 5 Ejemplo de recorte de señal

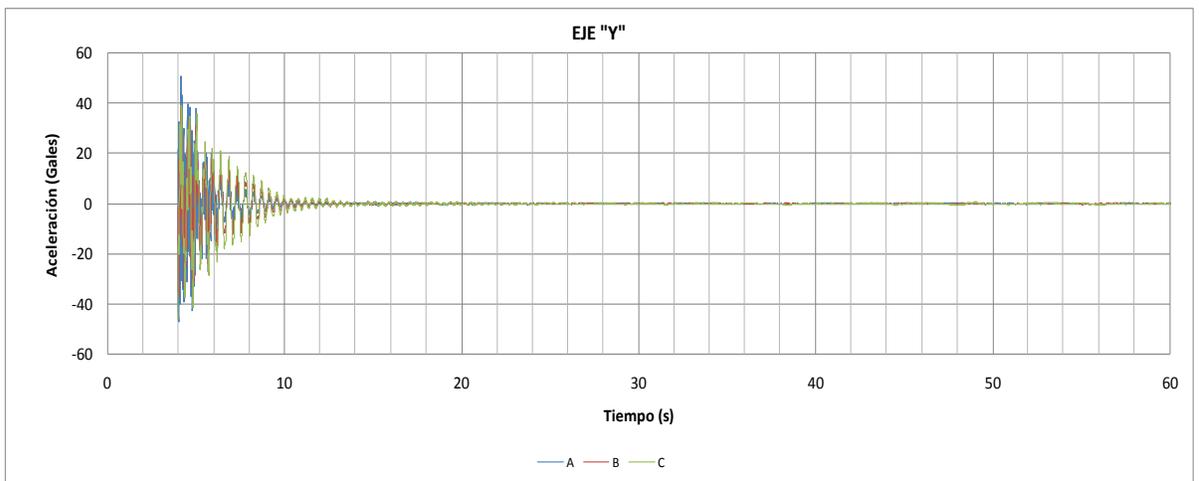


Figura 6 Señal recortada y filtrada

## RESULTADOS

### VIBRACIÓN POR OPERACIÓN

La vibración por operación medida en los pedestales de equipos eléctricos tales como transformadores de corriente, interruptores y transformadores de potencial revelaron que los niveles de aceleración están por debajo de  $0.5 \text{ m/s}^2$  ( $0.005 \text{ g}$ ) e incluso menores. Las mediciones realizadas en los transformadores de potencia mostraron que la aceleración es más alta, desde  $1 \text{ m/s}^2$  hasta  $9.8 \text{ m/s}^2$ . La figura 7 ilustra la señal obtenida de un transformador de potencia de la subestación Colomo (Manzanillo). Los espectros de Fourier indicaron que las frecuencias de vibración corresponden a múltiplos de 120 Hz.

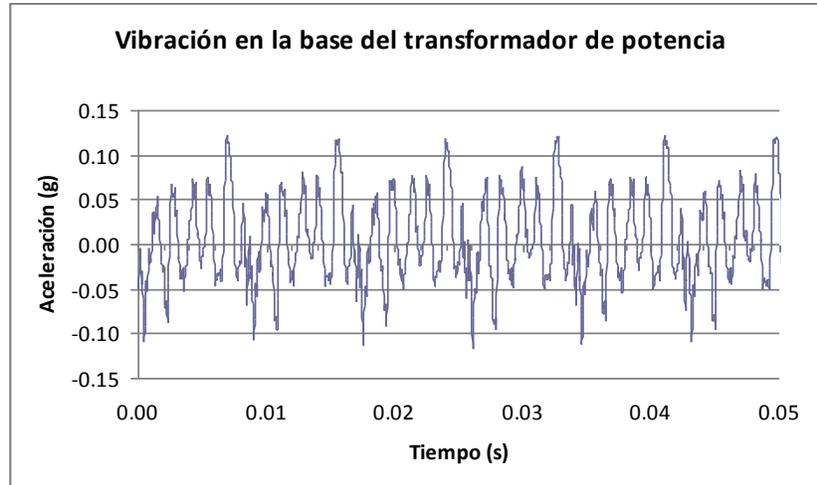


Figura 7 Señal registrada en la base de un transformador de la Subestación Colomo (Manzanillo)

### CÁLCULO DEL AMORTIGUAMIENTO

La obtención del amortiguamiento se realizó con base en la fórmula de decaimiento logarítmico (Chopra, 2006):

$$\zeta = 100 \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}} \quad (1)$$

Donde  $\zeta$  es el porcentaje del amortiguamiento crítico,  $j$  es el número de ciclos tomados en cuenta,  $i$  es el número del ciclo inicial,  $\ddot{u}_i$  es la aceleración máxima del ciclo inicial y  $\ddot{u}_{i+j}$  es la aceleración máxima del ciclo  $i+j$ . La curva de decaimiento logarítmico se ajustó favorablemente a la mayoría de las señales experimentales.

Se eligió calcular el amortiguamiento con la señal del acelerómetro C debido a que era la que mejor definía el decaimiento logarítmico y que tenía las mayores aceleraciones. En las figuras 8 a 13 se ilustra el ajuste de la curva a los registros del TC, INT y CUCH de la Subestación Ixtapa Potencia para los dos tipos de excitación.

Los equipos, aunque no estaban energizados, sí se encontraban interconectados. En algunas de las señales obtenidas puede verse el efecto de los cables en la vibración del equipo. Cabe mencionar que en varios casos la excitación del equipo eléctrico instrumentado llegaba a los equipos contiguos e incluso podía verse a simple vista un ligero movimiento de estos últimos. En este sentido, el caso más marcado fue el de las cuchillas, las cuales tienen pedestales conectados entre sí por medio de ángulos metálicos.

Tabla 1 Resultados experimentales obtenidos

| Subestación                 | Equipo | Tipo de prueba | Amortiguamiento (%) | Frecuencia fundamental (Hz) |
|-----------------------------|--------|----------------|---------------------|-----------------------------|
| Ixtapa Potencia             | TC     | Jalón simple   | 3.5                 | 2.2                         |
|                             |        | Jalón cíclico  | 4                   |                             |
|                             | INT    | Jalón simple   | 2                   | 1.2                         |
|                             |        | Jalón cíclico  | 2.8                 |                             |
|                             | CUCH   | Jalón simple   | 0.6                 | 4                           |
|                             |        | Jalón cíclico  | 0.6                 |                             |
| Pie de la Cuesta (Acapulco) | TC     | Jalón simple   | 3.5                 | 2.14                        |
|                             |        | Jalón cíclico  | 4                   |                             |
|                             | INT    | Jalón simple   | 4                   | 1.175                       |
|                             |        | Jalón cíclico  | 4                   |                             |

En la figura 13 se puede observar la señal del acelerómetro C de una cuchilla. Antes de 3 segundos la señal no tiene un comportamiento de vibración libre con decaimiento logarítmico; a partir de los 3 segundos la señal se vuelve más uniforme y en forma general sigue el decaimiento logarítmico. Sin embargo, la señal sigue presentando ligeros decrementos (de 3.2 a 7 segundos) e incrementos (de 9 a 10 segundos) de amplitud que la desvían de la curva de decaimiento logarítmico ideal y que pudieran deberse a la interacción con los equipos contiguos a través del cableado eléctrico y la unión entre pedestales. Un comportamiento parecido puede observarse en la figura 8.

Por lo tanto, los resultados obtenidos de frecuencias fundamentales y amortiguamientos están afectados por la interacción entre equipos contiguos. Los amortiguamientos calculados se muestran en la tabla 1.

El amortiguamiento en los equipos estudiados varió entre 0.6 y 4%. En los transformadores de corriente y en el interruptor de Ixtapa el amortiguamiento resultó menor en la prueba con excitación jalar y soltar que en la prueba de jalón cíclico. En la cuchilla de Ixtapa y en el interruptor de Acapulco los amortiguamientos calculados fueron iguales para ambos tipos de excitación. Como se mencionó anteriormente, en la prueba de jalón cíclico se alcanzaron mayores aceleraciones y desplazamientos. Al encontrarse mayor amortiguamiento en las pruebas de jalón cíclico puede inferirse que el amortiguamiento es proporcional a la deformación del sistema pedestal-equipos eléctricos.

### DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTALES

De cada señal diezmada, recortada y filtrada se obtuvo su espectro de Fourier. Con la interpretación gráfica de los espectros de Fourier se determinaron las frecuencias fundamentales de cada equipo. En la figura 14, 15 y 16 se encuentra la representación gráfica del espectro de Fourier del TC, INT y CUCH de la Subestación Ixtapa Potencia. La máxima amplitud del espectro varía entre 1 y 4 Hz y representa la frecuencia fundamental de cada equipo. A frecuencias mayores de 10 Hz se pueden observar picos de menor amplitud relacionados con los modos superiores de vibración. En la figura 14 están claramente marcados los picos asociados a los dos primeros modos de vibración. Sin embargo, en espectros como el de la figura 15 no fue tan clara la identificación del segundo modo y se prefirió no reportar los segundos modos en este artículo.

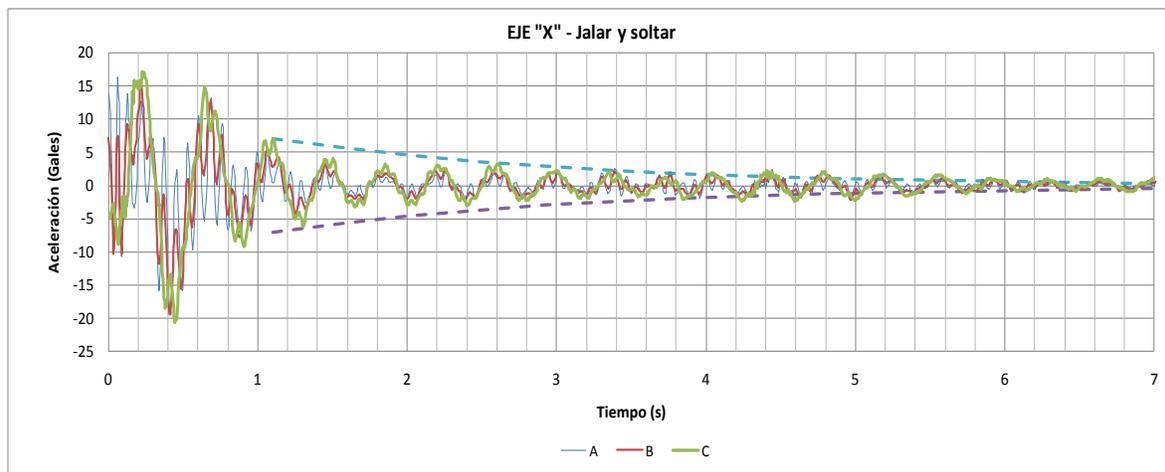


Figura 8 Cálculo del amortiguamiento del TC-Ixtapa Potencia en prueba de jalar y soltar ( $\zeta = 3.5\%$ )

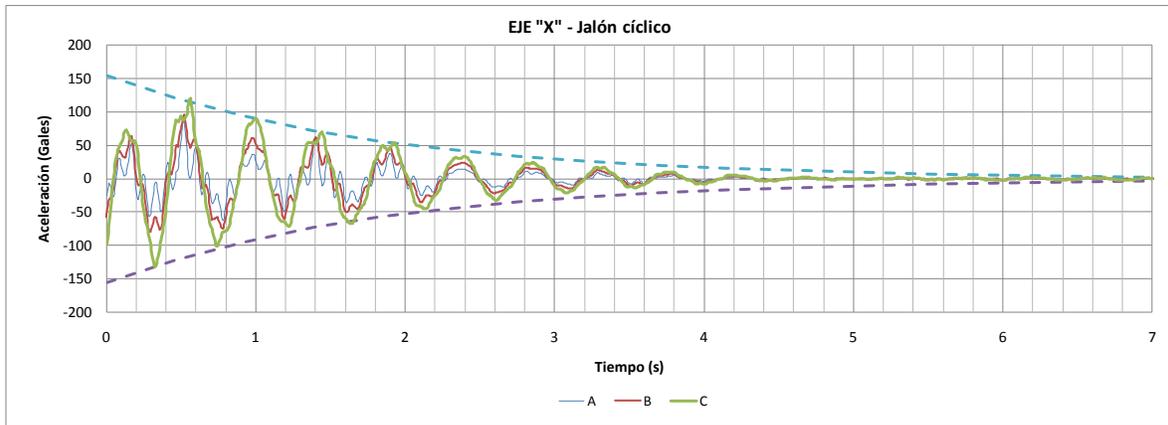


Figura 9 Cálculo del amortiguamiento del TC-Ixtapa Potencia en prueba de jalón cíclico ( $\zeta = 4\%$ )

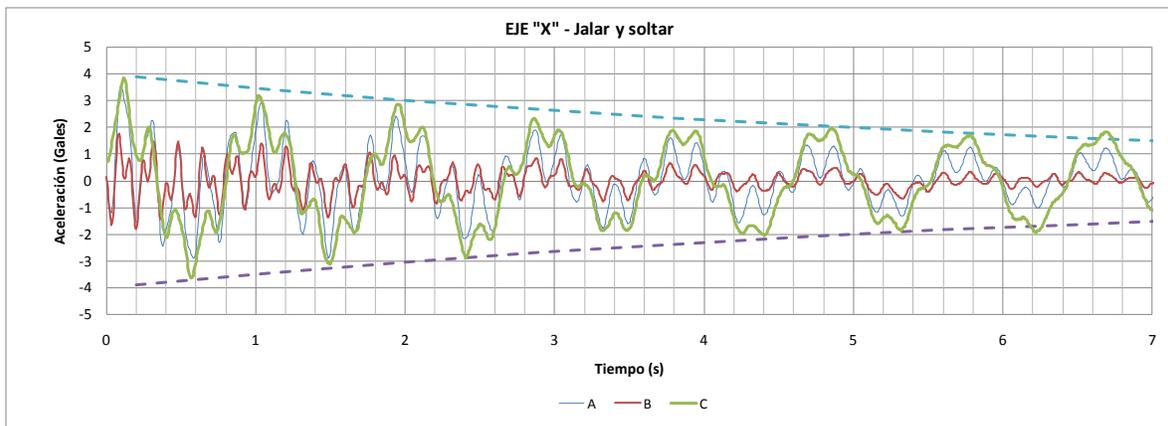


Figura 10 Cálculo del amortiguamiento del INT-Ixtapa Potencia en prueba de jalar y soltar ( $\zeta = 2\%$ , filtro pasabanda de 1 a 8 Hz)

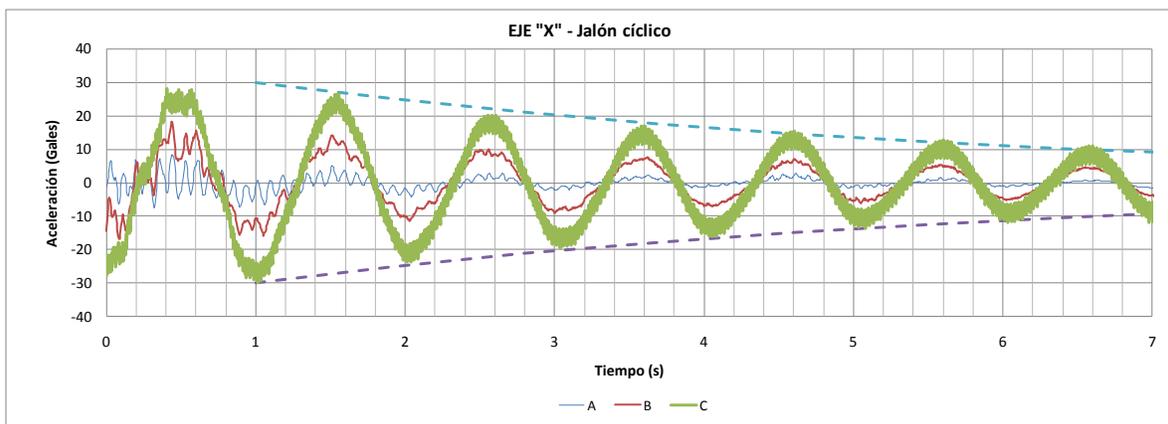


Figura 11 Cálculo del amortiguamiento del INT-Ixtapa Potencia en prueba de jalón cíclico ( $\zeta = 2.8\%$ )

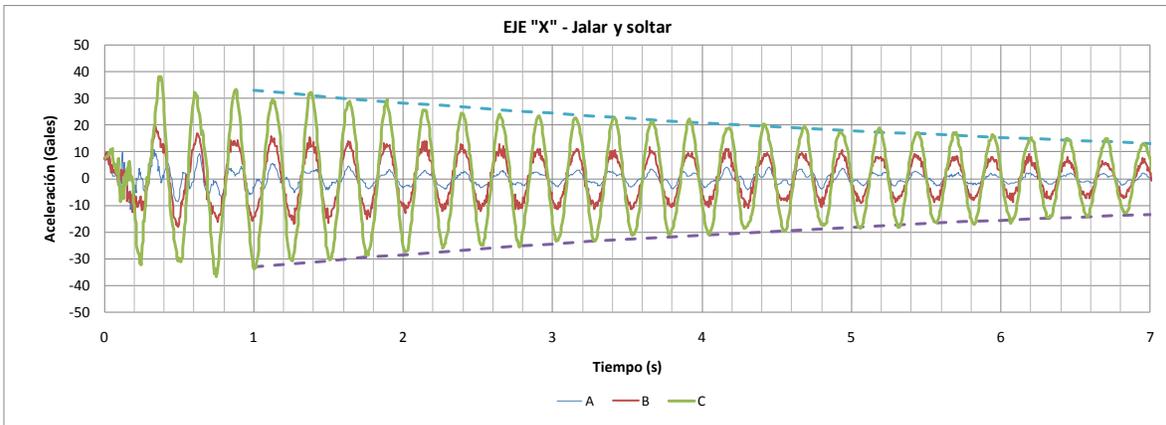


Figura 12 Cálculo del amortiguamiento de la CUCH-Ixtapa Potencia en prueba de jalar y soltar ( $\zeta = 0.6\%$ )

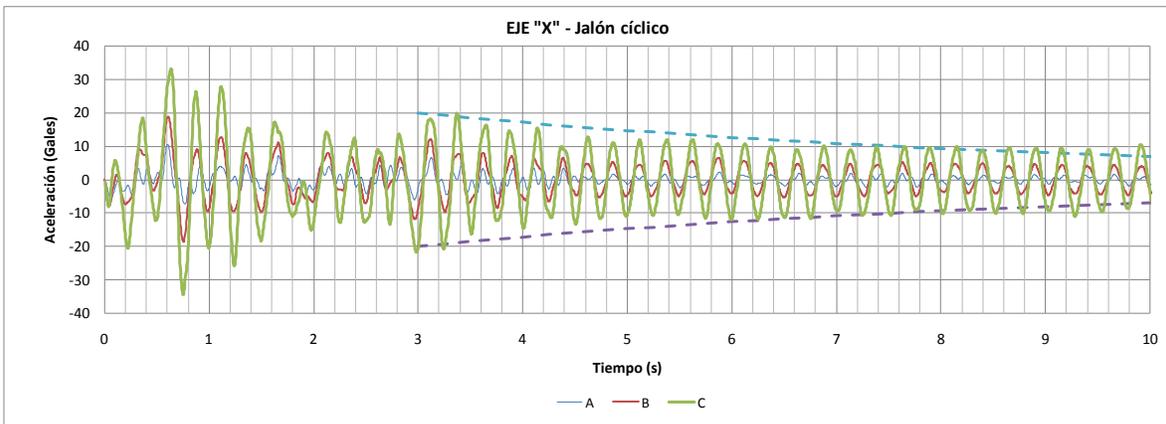


Figura 13 Cálculo del amortiguamiento de la CUCH-Ixtapa Potencia en prueba de jalón cíclico ( $\zeta = 0.6\%$ , filtro pasabanda de 1 a 8 Hz)

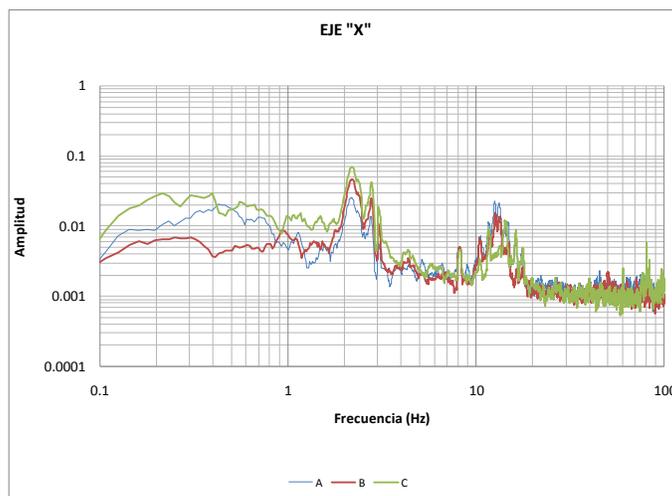
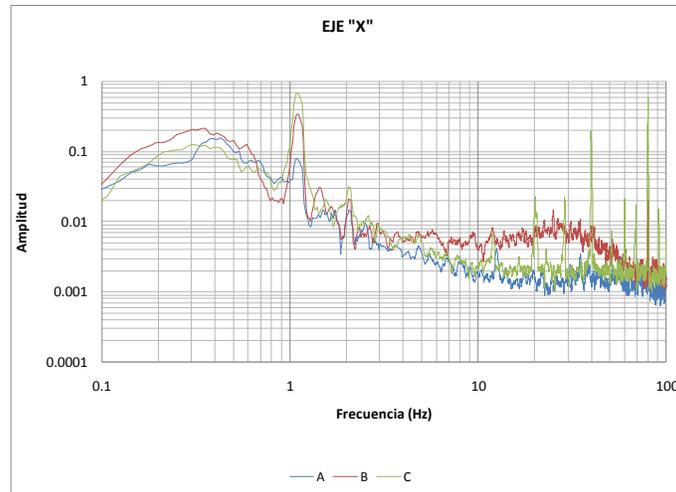
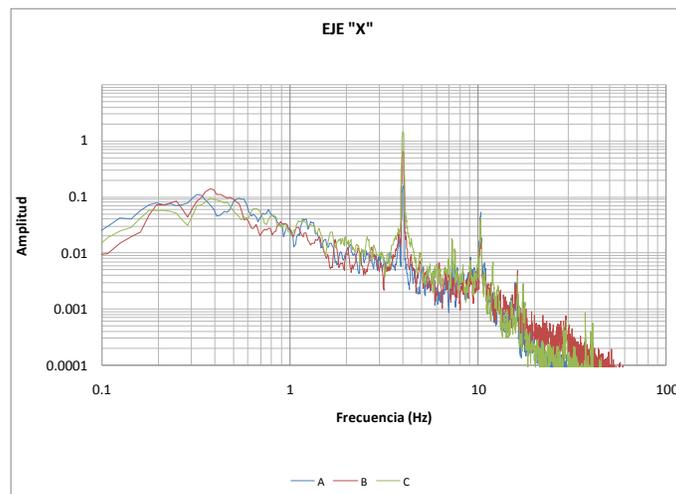


Figura 14 Espectro de Fourier del TC, Ixtapa Potencia



**Figura 15 Espectro de Fourier del INT, Ixtapa Potencia**



**Figura 16 Espectro de Fourier de la CUCH, Ixtapa Potencia**

## CONCLUSIONES

Los resultados de las mediciones en equipos energizados revelaron que los niveles de vibración en equipos tales como Interruptores, transformadores de potencia y transformadores de corriente son muy bajos y no influyen ni en el diseño de pedestales ni el de las cimentaciones. Además, se comprobó que los equipos que generan vibración durante su operación son aquellos que tiene un devanado.

Por otra parte, la instrumentación de los equipos no energizados permitió calcular algunas de sus propiedades dinámicas, como fueron el periodo fundamental y el porcentaje de amortiguamiento crítico. De los análisis realizados se encontró que el porcentaje de amortiguamiento varía 0.6 y 4.0% para los equipos estudiados. Además, se encontró que el amortiguamiento es mayor cuando el equipo está sujeto a mayores desplazamientos. Por otra parte, las frecuencias fundamentales de los equipos varían entre 1.2 y 4.0 Hz.

Es importante, resaltar que estos estudios forman parte de un proyecto integral que se está llevando a cabo en la Gerencia de Ingeniería Civil del Instituto de Investigaciones eléctricas, que incluye nuevos procedimientos para el diseño de cimentaciones de equipos menores y estructuras mayores de subestaciones eléctricas



considerando la vibración provocada por la operación de las mismas y la provocada por eventos sísmicos. Por otra parte, los resultados de este trabajo permitirán verificar los resultados de estudios dinámicos que se están realizando en varios equipos menores, modelados con elemento finito.

### **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a los Ingenieros Pedro Zazueta, Cuauhtémoc Cordero, así como a los ingenieros de las Subestaciones de CFE visitadas por las facilidades prestadas para la realización de los experimentos.

### **REFERENCIAS**

Archundia, H (2009), "**Análisis de vibración de equipos eléctricos**", Gerencia de Ingeniería Civil, Instituto de Investigaciones Eléctricas, diciembre.

Chopra A.K. (2006), "**Dynamics of structures**", Prentice Hall, tercera edición, pp. 912 pp.

IIE (2005), "**Especificación de criterios sísmicos de aceptación para la adquisición de equipos para subestaciones eléctricas de transmisión**", Reporte final, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

IIE (2010), "**Análisis de vibración de equipos eléctricos considerando dispositivos de disipación de energía sísmica**", Reporte final, Instituto de Investigaciones Eléctricas.