
ANÁLISIS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS HISTÓRICOS DE UN EDIFICIO UBICADO DENTRO DE LAS INSTALACIONES DEL IMP CDMX, COMO MODELO PARA LA PREVENCIÓN ANTE SISMOS.

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
CENAPRED
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL MÉXICO
SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA

Elaboró:

Emmanuel Ramírez Álvarez

Subdirección de Riesgos Sísmicos

Ciudad de México, Diciembre 2019

CONTENIDO

ABSTRACT	3
RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Alcances y Objetivos.....	4
1.3. Ubicación.....	5
2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA Y LA INSTRUMENTACIÓN.....	5
2.1. Características de la estructura del edificio Lara Sosa	5
2.2. Características de la Instrumentación Sísmica del edificio.....	6
3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO	7
3.1. Análisis espectral de las señales.....	8
3.2. Técnica de Nakamura	11
4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	12
4.1. Propiedades dinámicas de la estructura.....	14
1.1. Período del suelo	20
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	20
REFERENCIAS.....	21
ANEXO A.....	22
ANEXO B.....	26

ABSTRACT

One of the main concerns after a strong earthquake is the effects on the structures, because on many occasions the non-structural elements suffer great damage, alarming the user, about the security and continuity of use of the property. For this reason, after an important seismic event, it is necessary to evaluate the state of the structure through different tests. One of the tests is the experimental determination of dynamic parameters through a spectral analysis to identify fundamental frequencies and periods, modal forms and critical damping, and are of great importance for the evaluation of their structural health. They also allow quantitative knowledge of the excitations imposed and their response during a seismic event. These values can will be use to calibrate structural models of the conditions of flexibility or stiffness that are presented at the time of the structural review. This paper describes the spectral analysis performed for the “Lara Sosa” building, located in the Mexican Petroleum Institute (IMP), using information on seismic events recorded from 1993 to 2013, with the seismic instrumentation located within the structure, in charge of the National Center for Disaster Prevention (CENAPRED). These results serve to raise awareness about the importance of seismic instrumentation of structures, also the type of analysis and procedures presented here can serve as a general guide of the minimum analyzes to perform in similar studies, from commissioning and throughout their life useful of a building.

RESUMEN

Los daños en las estructuras después de un sismo fuerte y durante su vida útil es una de las principales preocupaciones, debido a que en muchas ocasiones los elementos no estructurales sufren gran daño, alarmando al usuario final sobre la seguridad y continuidad de uso del inmueble. Por tal motivo, es necesario evaluar el estado de la estructura a través de distintas pruebas. Las pruebas para la determinación experimental de los parámetros dinámicos a través de un análisis espectral, son de gran utilidad e importancia para estas evaluaciones debido a su bajo costo y rápida aplicación. También permiten conocer de forma cuantitativa las excitaciones impuestas y su respuesta durante un evento sísmico cuando la estructura esta instrumentada durante el evento sísmico. Estos parámetros sirven para calibrar modelos matemáticos estructurales de las condiciones de flexibilidad, rigidez y amortiguamientos críticos. En el presente trabajo se describen los resultados obtenidos, utilizando la información de eventos sísmicos registrados de 1993 a 2013 en el edificio “Lara Sosa” ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Dicha edificación cuenta con un arreglo instrumental acelerométrico permanente a cargo del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Con los datos obtenidos se identificaron la variación de los periodos fundamentales, formas modales y amortiguamientos críticos, además fue posible identificar los desplazamientos efectivos en la azotea de la estructura para cada evento analizado. Estos resultados sirven como guía de los estudios mínimos que se deben realizar para monitorear de la salud estructural de las edificaciones, también para concientizar sobre la importancia de la instrumentación sísmica. Además, el tipo de análisis y procedimientos aquí presentados pueden servir como una guía general de los análisis mínimos a realizar en estudios similares, durante la vida útil de una edificación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El diseño de edificios requiere el uso de modelos matemáticos para predecir el comportamiento dinámico que pueden experimentar durante su vida útil; comúnmente, en ellos se consideran ciertas hipótesis de algunos aspectos estructurales, en los cuales existen grandes incertidumbres de su comportamiento real ante excitaciones dinámicas, entre los que destacan los efectos de interacción suelo-estructura, los efectos de torsión, la flexibilidad del diafragma de piso, la efectividad de las juntas constructivas y la participación de los elementos no estructurales (CENAPRED, 1999).

La importancia de la instrumentación sísmica de edificios, se sustenta en la facilidad para realizar evaluaciones cuantitativas de las excitaciones impuestas por los sismos a las estructuras y de las respuestas de las mismas. El objetivo del estudio de edificios es contribuir a la comprensión de su respuesta dinámica ante sismos de gran intensidad, que es precisamente para estos casos donde subsisten las mayores controversias, y ello conducirá a mejorar los criterios de diseño y evaluación estructurales (Alcántara et al., 2002).

Para determinar las características dinámicas de una estructura a través de métodos experimentales, se puede utilizar el ruido del tránsito de vehicular, del empuje del viento y el ruido generado por el uso de la misma estructura. También se pueden realizar pruebas de vibración forzada, en la cual la estructura es excitada por una vibración constante con uno o más motores de vibración que tienen un control preciso. Otra prueba se realiza con registros sísmicos de los movimientos fuertes y de ruido ambiental. Para el análisis de los registros obtenidos con las pruebas mencionadas se utilizan técnicas propias del análisis espectral de señales.

En el presente estudio analizo la información de 23 registros sísmicos obtenidos entre 1993 a 2018, con acelerómetros triaxiales pertenecientes a la red de instrumentación sísmica del edificio LARA SOSA, ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), en la Ciudad de México (CDMX), a cargo del CENAPRED. Esta estructura cuenta con cinco niveles y se encuentra desplatada en la parte norte de la ciudad en terreno tipo II o zona de transición (CENAPRED, 1999), de acuerdo con la microzonificación sísmica del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF-2004), y que sigue vigente en el nuevo reglamento (RCDF-2017).

1.2. Alcances y Objetivos

En este estudio se describe el procedimiento para la obtención de las propiedades dinámicas del Edificio Lara Sosa, durante los eventos sísmicos más importantes de 1993 a 2014, para lo cual se ha realizado los siguientes pasos:

- Recopilar y analizar la información disponible de 23 registros de aceleración obtenidos durante sismos fuertes en el edificio instrumentado “Lara Sosa” del IMP.
- El análisis espectral de los registros sísmicos, para la estimación de las propiedades dinámicas estructurales del edificio de 5 niveles “Lara Sosa”.

- Determinación experimental de los periodos estructurales de vibrar del edificio, para obtener, de las condiciones de flexibilidad o rigidez que se presentan y su estado de salud estructural.

1.3. Ubicación

El edificio LARA SOSA, está ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), en Av. De los Cien Metros, Esq. Poniente 134, Alcaldía Azcapotzalco en la Ciudad de México (CDMX). Las coordenadas geográficas donde se ubica la estructura en análisis es: Long -99.1489° W, Lat 19.4885° N (Figura 1.1).



Figura 1.1 Ubicación del edificio en estudio (LARA SOSA) dentro de las instalaciones del IMP en la Ciudad de México.

2. Características de la estructura y la instrumentación.

2.1. Características de la estructura del edificio Lara Sosa

El edificio LARA SOSA, se ubica dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), en la Ciudad de México (CDMX). Esta estructura cuenta con cinco niveles y se encuentra desplatada en la parte norte de la ciudad, en los límites de la Zona II y IIIa (Zona de Transición y Lago respectivamente), de acuerdo con la microzonificación sísmica del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF-2004), y que sigue vigente en el nuevo reglamento (RCDF-2017).

El tipo de estructuración del edificio LARA SOSA del IMP, es a base de columnas y vigas de concreto presforzado y tiene cinco niveles. En la dirección longitudinal cuenta con 20 crujías de 3.3 m cada una sin existir juntas constructivas. En la dirección transversal sólo tiene una crujía de 14.7 m, por lo que su relación largo a ancho es de 4.5 m. La altura de entrepiso es de 4.05 m en el primero y de 3.85 m en los entrepisos restantes (Figura 2.1).

Las columnas del edificio son de una sola pieza, es decir, son continuas desde el primer nivel hasta el nivel cinco, y su forma es la conocida como "árbol de navidad", con elementos de soporte horizontales (paralelos a la dirección larga del edificio) con longitud igual a la mitad del claro en esta dirección. Las vigas en la dirección transversal, son en forma de "T"

con un peralte de 70 cm y descansan sobre ménsulas que son parte de las columnas (CENAPRED, 1999).

La cimentación está resuelta por un cajón de cimentación con contratraves en ambas direcciones desplantado a 2.5 m de profundidad.

2.2. Características de la Instrumentación Sísmica del edificio

La instrumentación sísmica del edificio Lara Sosa (LS) del IMP ha tenido cambios importantes a través de los años, de 1990 a 1996 contaba con cuatro acelerómetros. De 1996 hasta la actualidad la instrumentación sísmica consta de 8 acelerógrafos triaxiales. Sin embargo, fue hasta el año de 2014 que aún operaban con normalidad, de 2014 a la fecha, algunos equipos han estado fuera de servicio u operando de manera intermitente.

La instrumentación sísmica del año 1990 a 1996, contaba con cuatro acelerómetros triaxiales ubicados de la siguiente manera; uno en la azotea (3), uno en la base (2), uno más en campo libre (sup) y uno en pozo, a 80 m de profundidad (Figura 2.1). La orientación de los acelerómetros fue: canal X (Transversal T) coincide con la dirección transversal del edificio; mientras que el canal Y (Longitudinal L) se orientó con la dirección longitudinal del edificio.

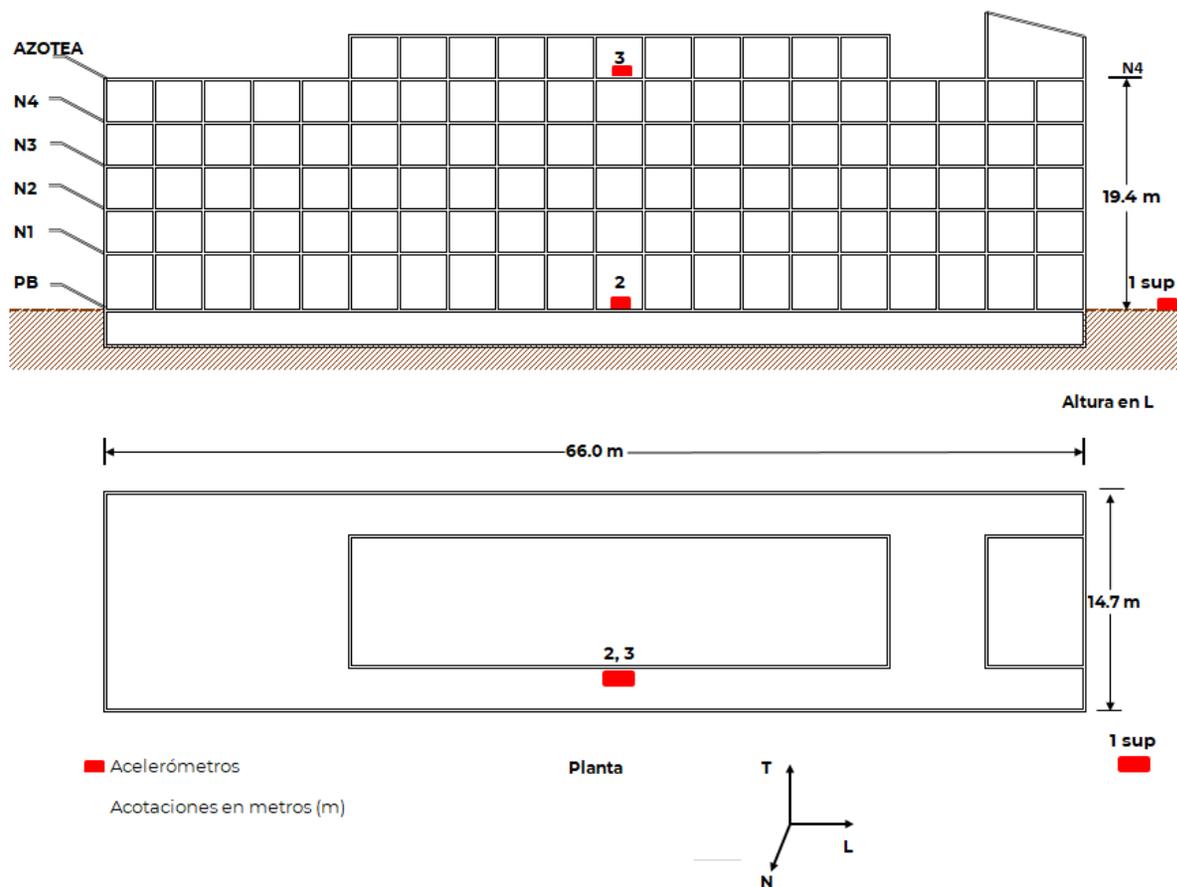


Figura 2.1 Ubicación de los equipos de la instrumentación sísmica del edificio Lara Sosa del IMP del año 1990 a 1996.

En el año de 1996 se realizó una de la ampliación de la instrumentación sísmica en el edificio llegando a ocho acelerómetros triaxiales. La disposición de los equipos en la azotea es; uno en la esquina poniente (8), uno al centro (4), uno más en la esquina oriente (6) de forma diagonal, un equipo en campo libre (sup) en superficie y uno en pozo a 80 m de profundidad (Figura 2.2). La orientación de los acelerómetros que se encuentran dentro del edificio fue: canal X (Transversal T) coincide con la dirección transversal del edificio; mientras que el canal Y (Longitudinal L) se orientó con la dirección longitudinal del edificio.

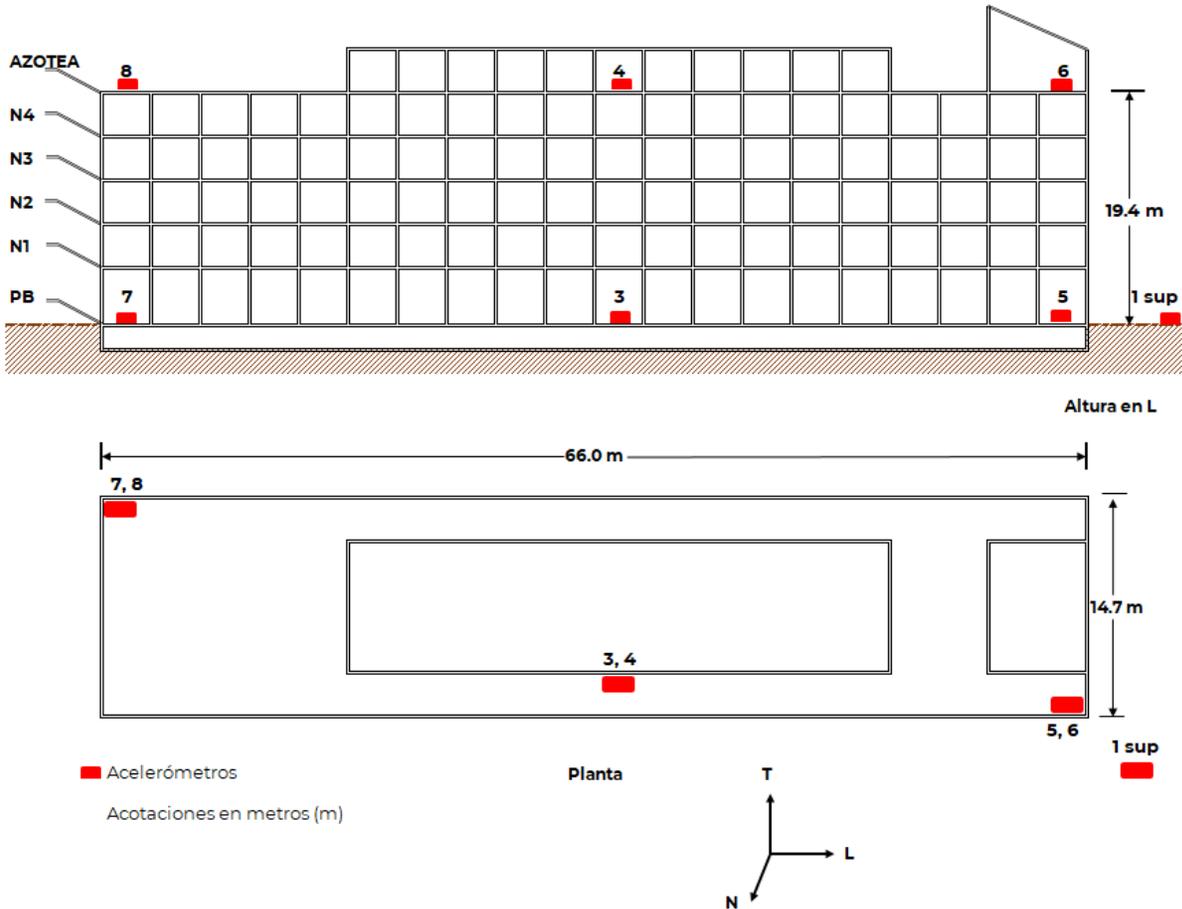


Figura 2.2 Ubicación de los equipos de la instrumentación sísmica del edificio Lara Sosa del IMP después de 1996.

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El análisis de propiedades dinámicas de las estructuras se divide en dos grupos, las técnicas paramétricas y las no paramétricas.

Las técnicas paramétricas, estiman un modelo matemático simplificado y se estiman los valores de los parámetros estructurales necesarios para producir una óptima correlación entre las respuestas medidas y calculadas (Muriá Vila, 2007).

Las técnicas no paramétricas consisten en determinar las propiedades y características del sistema estructural a partir del análisis de datos en los dominios del tiempo y la frecuencia (Muriá Vila, 2007). Este tipo de técnicas se utilizaron para este proyecto y se describen de forma general en este capítulo.

3.1. Análisis espectral de las señales

Para determinar las propiedades dinámicas estructurales y el período del suelo en este estudio se aplicó el Análisis de Fourier y la Técnica de Nakamura respectivamente; en las siguientes líneas se detalla el procesamiento de los registros que se realizó en cada análisis.

Las señales de vibraciones ambientales y sísmicas se obtienen en el dominio del tiempo, pero por practicidad es mejor trabajarlas en el dominio de la frecuencia. Para lograr lo anterior se realiza un análisis espectral convencional con las señales en el dominio del tiempo previamente corregidas.

De forma general se usa la Transformada de Fourier, la cual es una operación matemática que transforma una señal en el dominio del tiempo a otra en el dominio de la frecuencia y viceversa (Rodríguez, 2005). Sin embargo, para procesar las señales medidas se emplean analizadores digitales que muestrean las señales usando un convertidor analógico/digital en un período de tiempo y con una relación de muestreo constante, como consecuencia de lo anterior la Transformada de Fourier no se puede aplicar directamente ya que las señales asociadas a esta son continuas y en cambio se utiliza la Transformada de Fourier Discreta (DFT por sus siglas en inglés) la cual hace posible el Análisis de Fourier en sistemas digitales discretos (González, 2003). Sin embargo, la función que finalmente se usa es la Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) que es una versión más rápida de la DFT; la FFT reduce el tiempo de cálculo. La transformada de Fourier de una función $x(t)$ esta dada por:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

Una vez que se tienen las señales en el dominio de la frecuencia a través de la FFT, se puede empezar a identificar los parámetros dinámicos estructurales como son las frecuencias, formas modales y amortiguamiento crítico. Esto se realiza con los espectros de Fourier, espectros de potencia, coherencia y ángulo de fase.

Espectro de Fourier

El espectro de Fourier es una función de densidad espectral, donde se grafican las amplitudes de la Transformada de Fourier contra las frecuencias de una señal dada.

$$S_x(f) = |S_x(f)|e^{-i\theta(f)} \quad (2)$$

Donde $|G_x(f)|$ es el espectro de amplitudes y $\theta(f)$ es el espectro de fase.

Espectro de Potencia

El espectro de potencia o autoespectro se puede obtener mediante el producto del espectro de Fourier de una señal con su conjugada (Murià Vila, 2007).

$$S_{xx}(f) = S_x(f)S_x^*(f) \quad (3)$$

Función de Transferencia

La función de transferencia se define como la descripción matemática en el dominio de las frecuencias entre los espectros de Fourier de la entrada y la salida de un sistema. Permite encontrar la relación de amplitudes que hay entre dos señales. En términos prácticos es el cociente espectral entre los espectros de Fourier de salida y de entrada.

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad (4)$$

Con los espectros de Fourier y potencia se identifican las frecuencias correspondientes a los picos de mayor amplitud que corresponden a las frecuencias de la estructura. Es importante mencionar que no todos los picos máximos corresponden a las frecuencias de la estructura ya que algunos son debidos al ruido, es por ello que se recurre a la función de coherencia que es una medida de la relación que existe entre las señales de entrada y salida, cuyo valor varía entre 0 y 1.

Función de Coherencia

La función de coherencia es una medida de la relación que existe entre las señales de entrada y salida, es decir, que tanto la señal de salida es producto únicamente de la señal de entrada o si existe otro tipo de señales (ruido) que afecten la señal de salida. El valor de la función de coherencia varía entre 0 y 1, siendo 0 cuando no existe coherencia entre las señales y 1 cuando la coherencia es perfecta. Esta función está definida por la relación entre las funciones de transferencia.

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (5)$$

Cuando la función de coherencia es mayor que 0 pero menor que 1, se debe a una o más de las siguientes razones (Bendat y Piersol, 1993):

- Ruido extraño presente en las mediciones.
- Errores de resolución presente en las estimaciones espectrales.

- El sistema que relaciona la señal de salida $y(t)$ con la señal de entrada $x(t)$ no es lineal.
- La salida $y(t)$ es debida a otras entradas, además de $x(t)$.

Cuando para una frecuencia determinada el valor de la coherencia es cercano a 1 se afirma que esa frecuencia es propia de la estructura, caso contrario cuando el valor es cercano a 0.

Ángulo de Fase

Para las formas modales se recurre al ángulo de fase que también se grafica en función de la frecuencia, cuyo valor varía entre 0° y $\pm 180^\circ$. Para obtener un ángulo de fase representativo del sistema estructural analizado las señales deben ser sincronas.

La fase o ángulo de fase de las señales $\theta_{xy}(f)$ se obtiene con el cociente de la parte real y la parte imaginaria de la función del espectro cruzado de potencia (Murià Vila, 2007).

$$G_{xy}(f) = A_{xy}(f) + iB_{xy}(f)$$

$$|G_{xy}(f)| = \sqrt{A_{xy}^2(f) + B_{xy}^2(f)} \quad (6)$$

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \frac{B_{xy}(f)}{A_{xy}(f)}$$

El ángulo de fase varía entre $\pm 180^\circ$ y muestra la dirección relativa del movimiento entre dos puntos de medición, representados por dos señales registradas de manera simultánea. Un ángulo de fase igual a 0° entre dos señales para una frecuencia dada indica correspondencia en el sentido del movimiento y se dice que ambas frecuencias están en fase. Caso contrario cuando el ángulo de fase es igual a $\pm 180^\circ$, en este caso las frecuencias están en desfase.

El ángulo de fase es una herramienta útil para determinar las formas modales de una estructura, ya que permite indicar la dirección del movimiento de cada nivel de la estructura (Henao Ángel, 2013).

Amortiguamiento crítico

Para el caso de la fracción de amortiguamiento crítico se empleó en este estudio el método de Kawasumi y Shima (Kawasumi y Shima, 1965). Este método está basado en las amplitudes de un espectro de potencia con buena resolución empleando las siguientes expresiones:

$$A = \left(\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2 + \omega_1^2} \right) / \sqrt{\lambda - 1} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{A}{2} \left(1 - \frac{3}{8} A^2 \right) \quad (8)$$

El primer paso es seleccionar arbitrariamente un valor de λ (generalmente se elige $\lambda = 2$), posteriormente se divide el máximo valor del espectro de potencia entre λ . Del resultado obtenido se traza una línea horizontal a esa amplitud, cortando el espectro de potencia en dos puntos, se identifican las frecuencias asociadas a los valores de esos dos puntos; por lo que se obtiene ω_1 y ω_2 . Finalmente se calcula el parámetro A (amplitud de la respuesta) mediante la Expresión 1 y el resultado se sustituye en la Expresión 2 para obtener la fracción de amortiguamiento crítico. En la Figura 2 se ilustra el método descrito anteriormente.

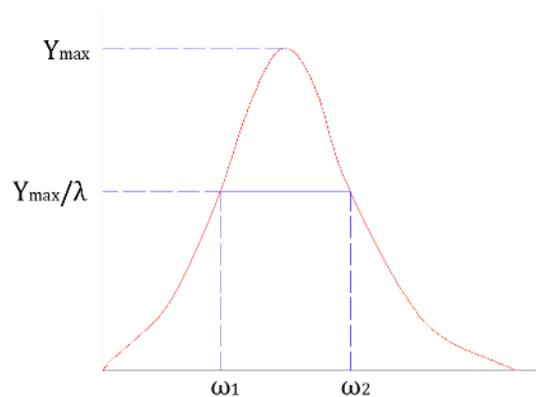


Figura 3.1. Método de Kawasumi y Shima para obtener el amortiguamiento crítico.

Los espectros y funciones explicadas anteriormente se emplean para determinar las frecuencias, formas modales y el amortiguamiento crítico de los sistemas estructurales, siguiendo el procedimiento descrito en la Subsección 3.2.

3.2. Técnica de Nakamura

La determinación del período del suelo se llevó a cabo con la Técnica de Nakamura (H/V). Esta técnica fue desarrollada en 1989 por Yutaka Nakamura, utilizando sismos fuertes pero además la aplicó por primera vez a microtemores de zonas urbanas en Japón; y puede aplicarse incluso a los registros de movimientos sísmicos fuertes o débiles (Lermo *et al.*, 1993). La técnica consiste en calcular un cociente de amplitudes espectrales (o función de transferencia empírica), de la siguiente manera: el numerador corresponde a las amplitudes del espectro de Fourier de las componentes horizontales (Este-Oeste y Norte-Sur) del registro obtenido, y el denominador corresponde a la amplitud del espectro de Fourier de la componente vertical del mismo registro.

$$\frac{H}{V}(f) = \sqrt{\frac{Sx(f)^2 + Sy(f)^2}{Sv(f)^2}} \quad (9)$$

Las expresiones anteriores se emplearon para el análisis espectral de los registros sísmicos seleccionados para este proyecto, pero además se pueden utilizar para los registros obtenidos durante pruebas de vibración ambiental. Para su implementación se utilizaron diferentes programas de cómputo (DEGTRA, GEOPSY, MATLAB y VIEW WAVE). Con este tipo de análisis fue posible verificar las propiedades dinámicas de la estructura del Edificio Lara Sosa del IMP.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Desde al año 1990 que entro en operación la instrumentación del edificio Lara Sosa del IMP, se han registrado sismos de diferentes Magnitudes e Intensidades, para este análisis se han seleccionado 23 sismos con magnitudes ≥ 3.5 en la tabla 4.1 se muestran las principales características de cada uno de los eventos seleccionados.

Tabla 4.1 Sismos analizados para la obtención de las propiedades dinámicas del edificio Lara Sosa del IMP.

No.	Fecha	M	Distancia Epicentral (km)	Aceleración máxima en la Azotea Centro (cm/s ²)			Aceleración máxima en la Base Centro (cm/s ²)			Acel máxima en Campo Libre (cm/s ²)
				T	L	V	T	L	V	
1	31/05/90	5.4	308	17.07	22.68	2.01	6.77	7.54	1.58	2.09
2	24/10/93	6.7	342	19.32	44.64	2.19	9.34	7.40	1.83	14.69
3	10/12/94	6.3	301	14.04	44.12	2.80	7.24	8.43	2.54	14.32
4	14/09/95	7.3	307	50.65	75.33	6.40	22.82	19.34	5.48	28.16
5	09/10/95	8.0	538	8.47	12.83	1.79	6.16	3.69	1.44	6.76
6	25/02/96	6.9	416	5.66	7.69	0.72	2.27	2.61	0.74	-----
7	15/07/96	6.6	303	14.94	28.04	4.35	5.98	6.23	2.95	-----
8	11/01/97	6.7	447	22.32	32.74	4.67	11.57	13.26	2.60	16.24
10	03/02/98	6.4	505	6.82	8.68	0.87	2.99	2.76	0.78	3.97
11	15/06/99	7.0	226	53.62	121.69	12.81	22.91	22.39	12.81	35.51
12	09/08/00	7.0	407	8.47	12.83	1.79	6.16	3.69	1.44	6.76
13	15/11/01	3.5	7	29.49	9.09	13.63	15.86	6.78	9.37	36.01
14	25/09/02	5.3	310	2.99	4.02	1.68	1.31	1.18	0.42	1.84
15	21/01/03	7.6	544	12.89	23.62	2.06	8.73	7.99	1.99	9.09
16	01/01/04	6.3	330	7.11	15.07	1.22	3.83	4.50	1.08	5.40
17	06/11/07	5.6	289	5.72	10.21	1.40	1.95	2.67	1.06	-----
18	28/04/08	5.6	184	9.38	16.01	4.17	4.32	4.42	4.18	7.34
19	27/04/09	5.7	294	16.88	19.50	8.0	5.78	4.83	1.58	-----
20	30/06/10	6.0	380	18.01	22.85	1.73	7.03	5.06	1.65	-----
21	07/04/11	6.7	570	3.71	5.68	1.06	1.78	1.56	0.76	-----
22	02/04/12	6.0	360	10.84	24.93	4.48	4.25	6.28	1.54	8.18
23	21/08/13	6.0	305	20.55	28.07	6.84	8.59	8.99	1.83	-----

En las Figuras 4.1 se observan los registros de aceleración, mientras que en la figura 4.2 y 4.3 se observan los registros de velocidad y desplazamiento obtenidos con la

historia de tiempo de aceleración, del evento con mayor intensidad (15/06/1999, M 7.0), registrado por el arreglo instrumental ubicados en el centro del edificio en concreto, en las tres componentes dos horizontales y una vertical en la azotea y base de la estructura, así como los de campo libre. Los registros completos de los registros analizados se muestran en el Anexo II.

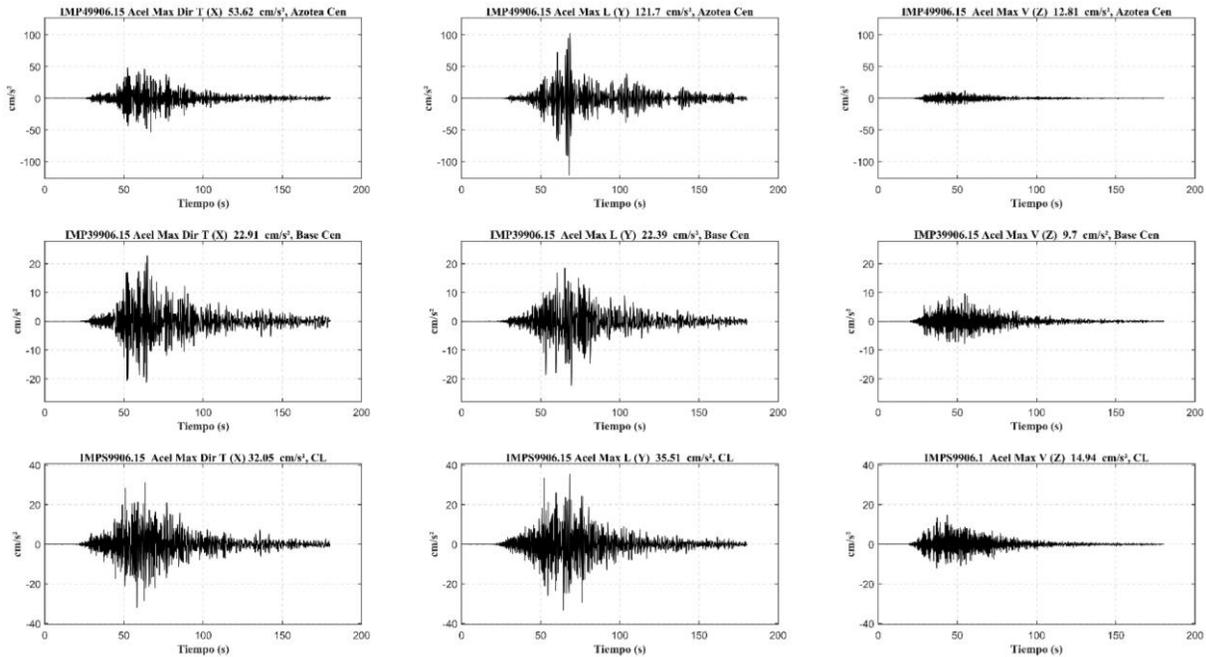


Figura 4.1 Registros de aceleración del sismo del 15 de junio de 1999, Magnitud 7.0.

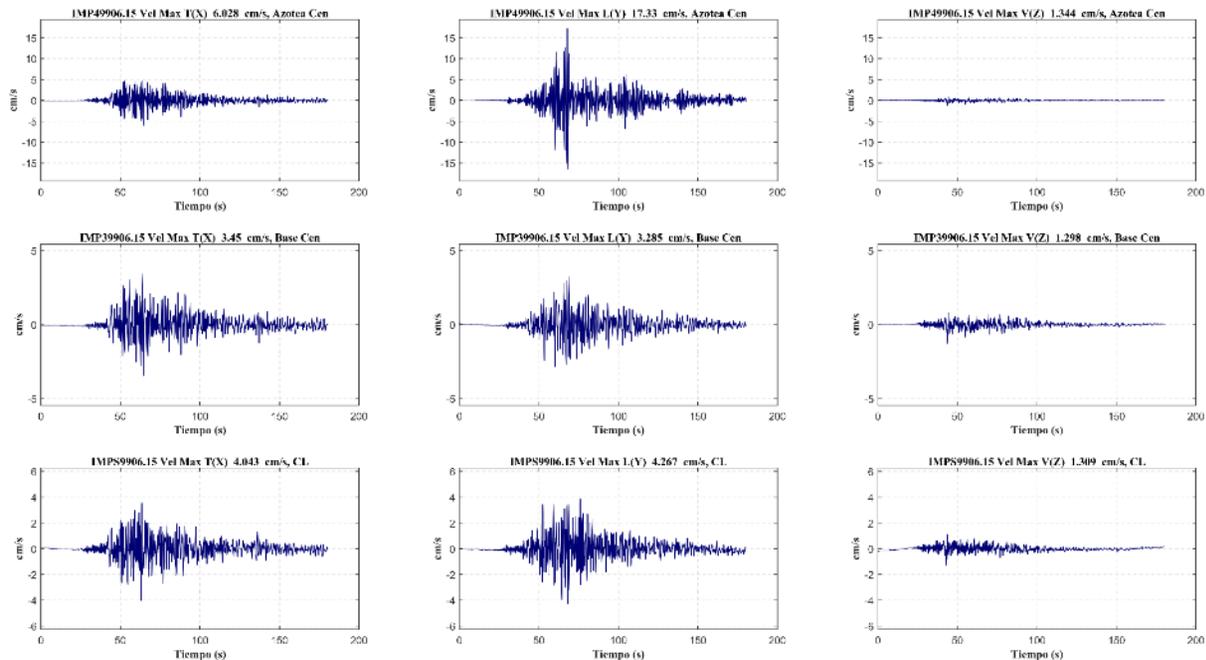


Figura 4.2 Registros de velocidad obtenido a partir del acelerograma del sismo del 15 de junio de 1999, Magnitud 7.0.

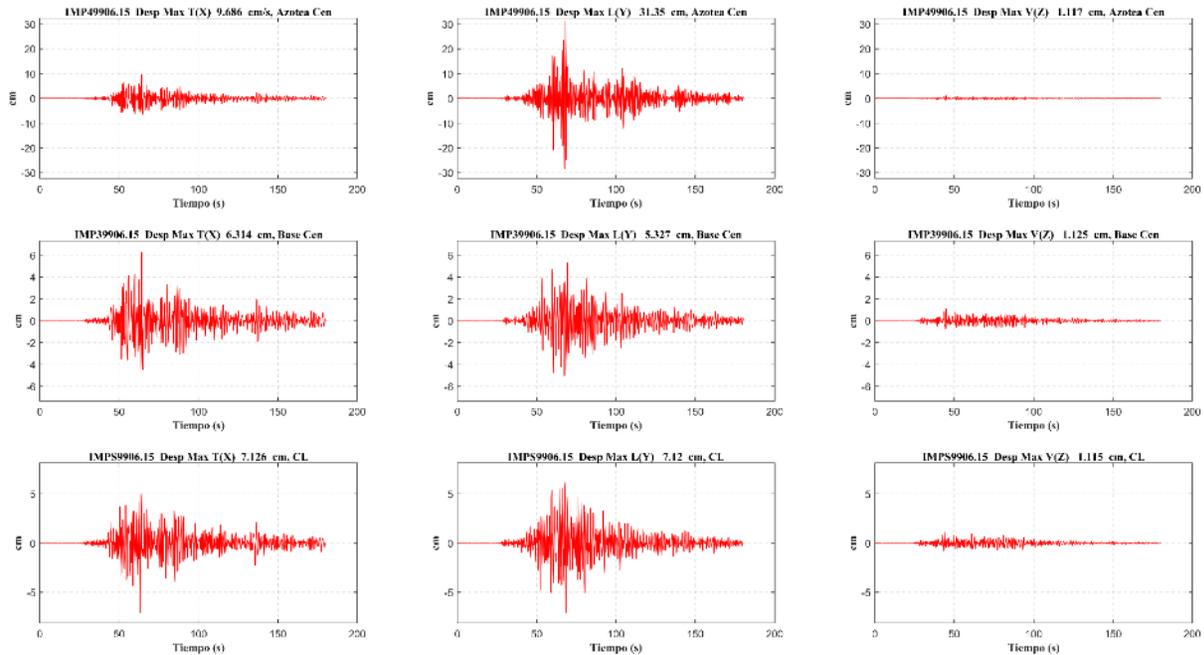


Figura 4.3 Registros de desplazamiento obtenido a partir del acelerograma del sismo del 15 de junio de 1999, Magnitud 7.0.

4.1. Propiedades dinámicas de la estructura

Para estudiar el comportamiento sísmico del edificio Lara Sosa se analizaron los datos en los dominios del tiempo y la frecuencia, para determinar diversas características estructurales como son las frecuencias de los modos naturales de vibración, amortiguamientos. Para el análisis de los registros sísmicos se aplicó la técnicas no paramétricas con base en análisis espectrales convencionales, el cual consistió en calcular los espectros de Fourier y varios cocientes espectrales con los registros, y así obtener las frecuencias fundamentales de vibración asociadas a los componentes T, L y torsión (R) del sistema estructura-suelo, descritos en el capítulo 3.

En la Figura 4.4 se muestran algunos de los espectros de Fourier de los puntos instrumentados en el arreglo Central (Centro de la Base, Centro de la Azotea) en la dirección T (Transversal) y en la dirección L (Longitudinal). Como se puede observar en esta figura se identifican frecuencias de 1.72 Hz y 3.45 Hz en la dirección T y en la dirección L respectivamente.

En la Figura 4.5 y 4.6 se presentan las coherencias y ángulos de fase de cada frecuencia identificada en la Figura 4.4. Como se observa, la frecuencia de 1.72 Hz tiene una coherencia de 0.96 cercana a 1 y un ángulo de fase cercano a 0°, por otro lado, la frecuencia de 3.45 Hz tiene una coherencia de 0.90 cercana a 1 y un ángulo de fase de 1.00° cercano a 0°; por lo anterior se determina que las frecuencias antes mencionadas son propias de la estructura y corresponden a los primeros dos modos de traslación.

Para la identificación del modo de torsión se emplearon los espectros de Fourier de todas las esquinas instrumentadas en el edificio (Azotea Poniente y Oriente), en la Figura 4.7 se muestran estos espectros en la dirección L y en la dirección T. Como se observa en la figura anterior se identifica una frecuencia de 5.59 Hz en todas las esquinas. En la Figura 11 se presenta la coherencia y ángulo de fase de esta frecuencia identificada, de acuerdo a esta figura, la frecuencia de 5.59 Hz tiene una coherencia de 0.90 cercana a 1 y un ángulo de fase de -179.90° cercano a $\pm 180^\circ$, por lo anterior se determina que la frecuencia antes mencionada es propia de la estructura y corresponde al tercer modo, que en el caso de edificios es el modo de torsión.

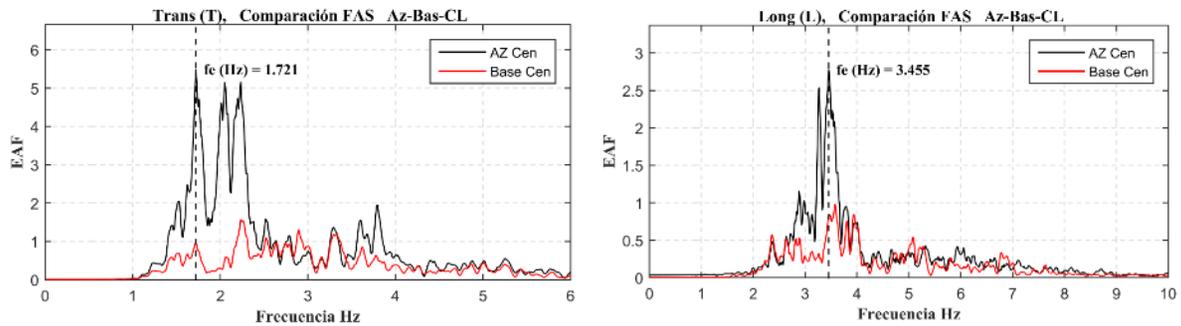


Figura 4.4. Espectros de Fourier del Arreglo central, en la dirección T y en la dirección L.

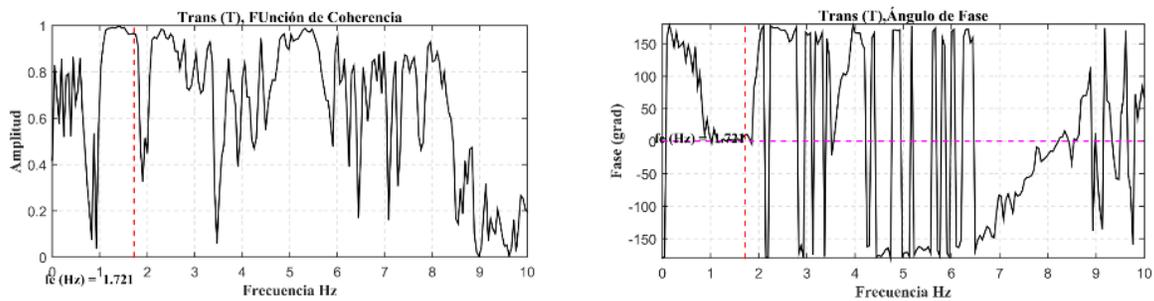


Figura 4.5. Coherencia y ángulo de fase para la frecuencia identificada de 1.72 Hz (T).

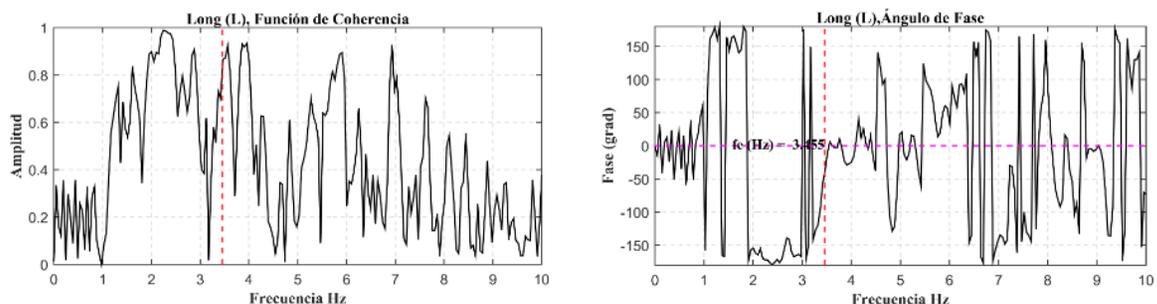


Figura 4.6. Coherencia y ángulo de fase para la frecuencia identificada de 3.45 Hz (L).

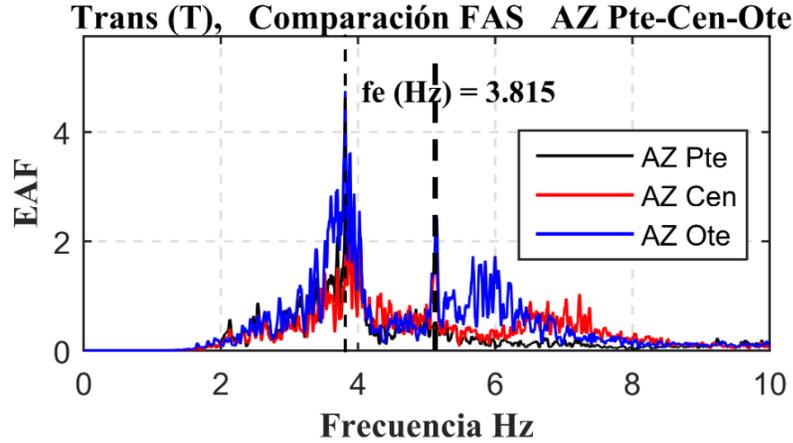


Figura 4.7. Espectros de Fourier del Arreglo Poniente, Centro y Oriente, en la dirección T.

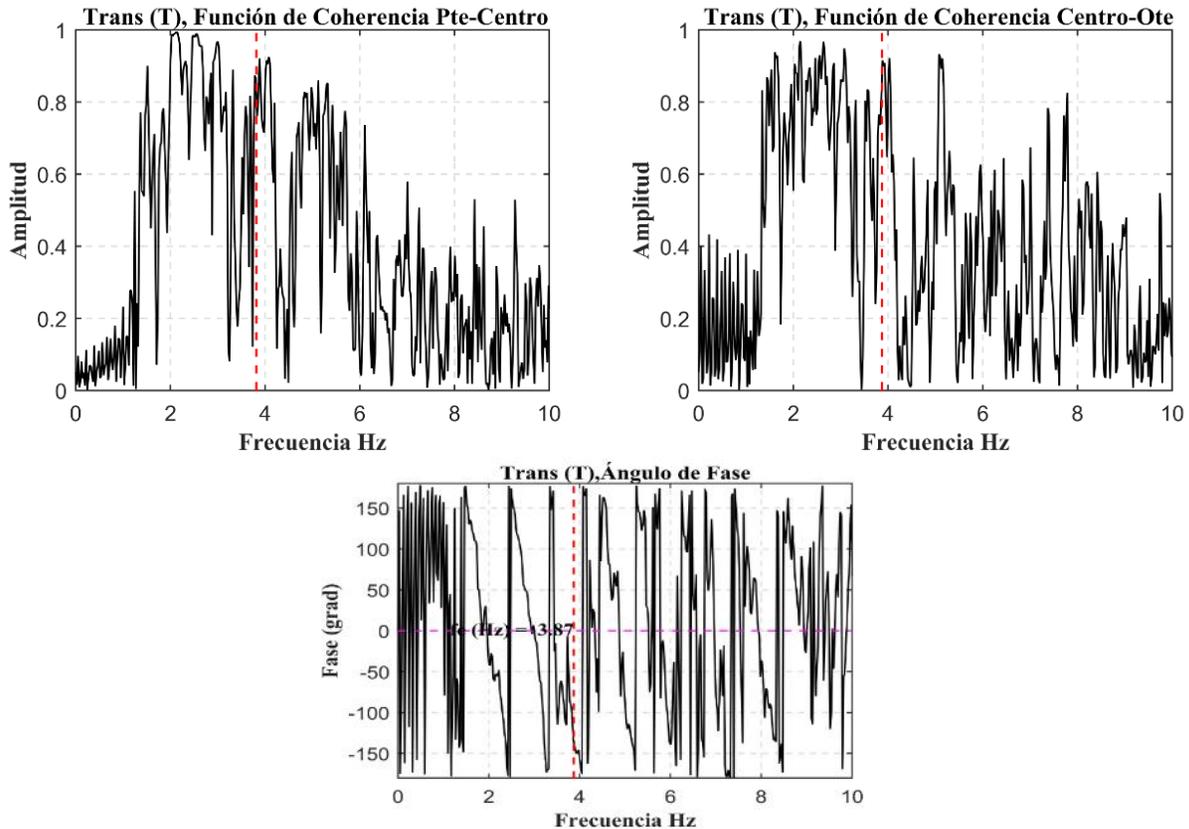


Figura 4.8. Coherencia y ángulo de fase para la frecuencia identificada de 5.59 Hz (T).

Con respecto al cálculo del amortiguamiento crítico, en la Figura 4.9 y 4.10 se muestran los espectros de potencia en la dirección T y L; por otra parte, en la Figura 4.11 se muestra el espectro de potencia para la frecuencia correspondiente a la

rotación. A estos espectros de potencia se les aplicó el método de Kawasumi y Shima para determinar el valor promedio de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente a las frecuencias identificadas de 1.72 Hz, 3.52 Hz y 5.59 Hz.

El valor de amortiguamiento crítico obtenido para la frecuencia de 1.72 Hz fue de 1.32 %, para 3.45 Hz fue de 1.24 % y para la frecuencia de 5.59 Hz fue de 1.19 %.

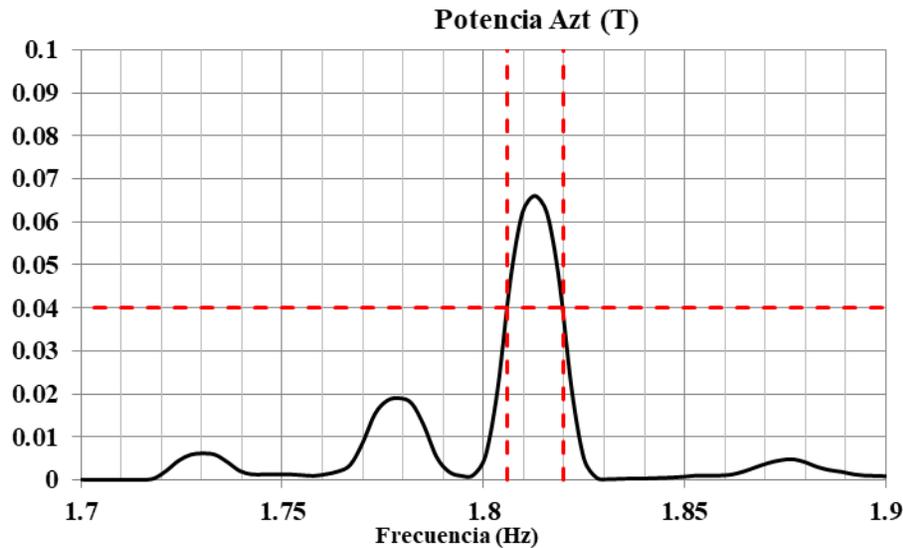


Figura 4.9. Aplicación del método de Kawasumi y Shima para determinar el valor promedio de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente a la frecuencia cercana a 1.72 Hz (T).

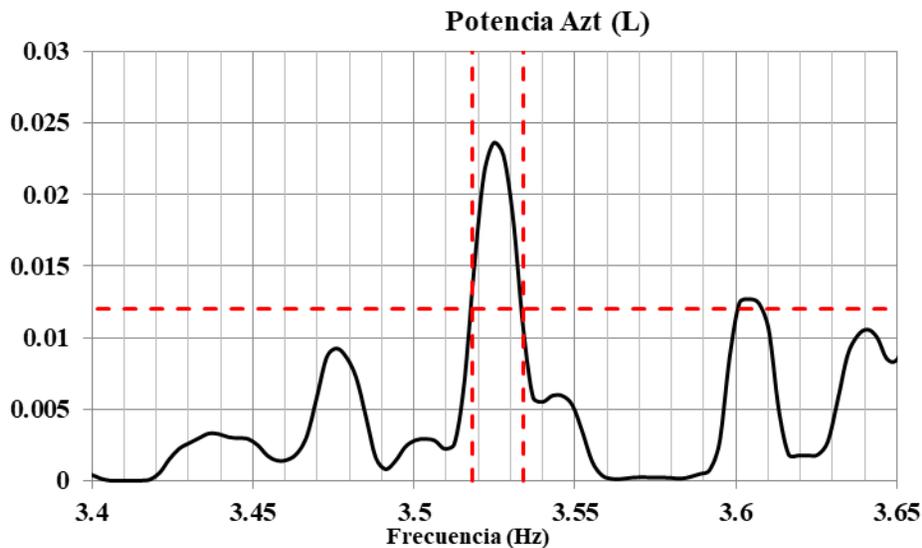


Figura 4.10. Aplicación del método de Kawasumi y Shima para determinar el valor promedio de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente a la frecuencia de 3.52 Hz (L).

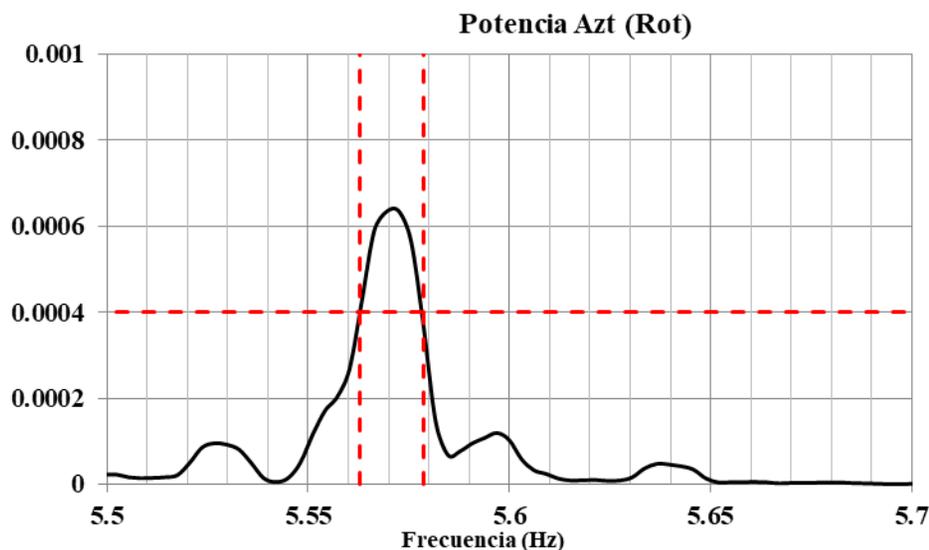


Figura 4.11. Aplicación del método de Kawasumi y Shima para determinar el valor promedio de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente a la frecuencia cercana a 5.59 Hz (X).

Tabla 4.2. Propiedades dinámicas estructurales identificadas en el Edificio Lara Sosa con la instrumentación central de 1990 a 2013

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Amortiguamiento crítico (%)	Dirección
1	1.72	0.58	1.32	Traslación (T)
2	3.45	0.29	1.24	Traslación (L)

Tabla 4.3. Propiedades dinámicas estructurales identificadas en el Edificio Lara Sosa con la instrumentación central, poniente y oriente de 1990 a 2013

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Amortiguamiento crítico (%)	Dirección
1	1.72	0.58	1.32	Traslación (T)
2	3.45	0.29	1.24	Traslación (L)
3	5.59	0.18	1.19	Rotación

Es importante mencionar que las frecuencias mostradas anteriormente son debidas a la respuesta del edificio con la interacción del movimiento del suelo, debido a que el Edificio Lara Sosa se ubica en la Zona III (zona de lago), el suelo sobre el que se desplanta es blando. Lo anterior indica que el movimiento del suelo puede llegar a influir en la respuesta dinámica del edificio, alargando sus períodos. En el presente estudio se realizó un procedimiento en las señales obtenidas para poder determinar que tanto influyó el movimiento del suelo en los resultados

presentados anteriormente. Este procedimiento consiste en hacer cocientes espectrales entre los espectros de Fourier de los puntos en los niveles superiores y un punto localizado en la base del edificio, como resultado de lo anterior se obtiene una función de transferencia en la cual las nuevas frecuencias identificadas se encuentran libres del movimiento del suelo, se hace la suposición que el edificio ahora está sobre suelo rígido acortándose sus períodos. La diferencia de períodos indicaría que tanto influye la interacción del suelo con la estructura.

Para este caso se realizaron cocientes espectrales del nivel de azotea (centros y esquinas) entre los puntos ubicados en la base de la estructura. En las Figuras 4.12 y 4.13 se muestran los resultados que se obtuvieron de los cocientes espectrales realizados en las direcciones correspondientes.

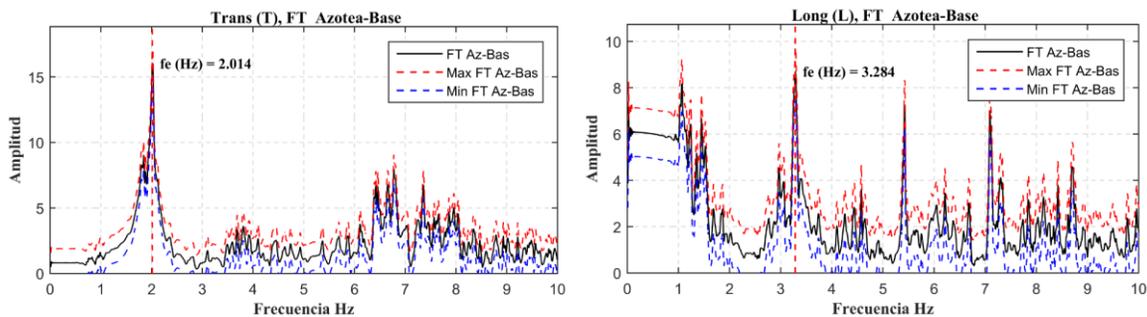


Figura 4.12. Funciones de transferencia de los puntos centro azotea y centro base para identificar las frecuencias de traslación en la dirección T y L.

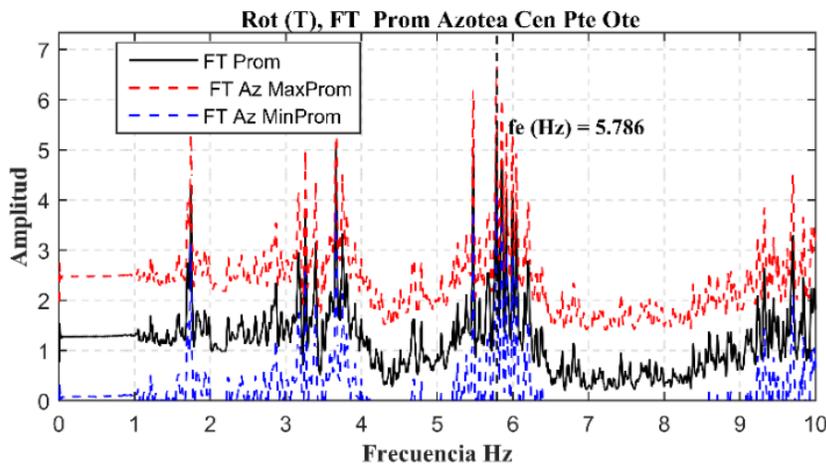


Figura 4.13. Función de transferencia de los puntos Centro y Poniente para identificar la frecuencia de torsión en la dirección T.

De acuerdo a las dos figuras anteriores las frecuencias identificadas de traslación son de 2.01 Hz en la dirección T y 3.28 Hz en la dirección Y. La frecuencia para el modo de torsión fue de 5.78 Hz, en base a los resultados anteriores se puede asegurar que el movimiento del suelo si influye en la respuesta dinámica del Edificio Lara Sosa del IMP. En la Tabla 4.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos con los cocientes espectrales.

Tabla 4.4. Resultados de los cocientes espectrales en el Edificio Lara Sosa del IMP

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Dirección
1	2.01	0.498	Traslación (X)
2	3.28	0.305	Traslación (Y)
3	5.78	0.173	Torsión

4.2 Período del suelo

En la Figura 4.14 se muestra la función de transferencia empírica que se obtuvo al aplicar la Técnica de Nakamura al registro de campo libre (CL). De la figura anterior se observa que la frecuencia identificada es de 1.17 Hz, al calcular la inversa de esta frecuencia obtenemos que el período del suelo es de 0.85 s. Lo cual es acorde con lo que se esperaba, ya que es un suelo blando.

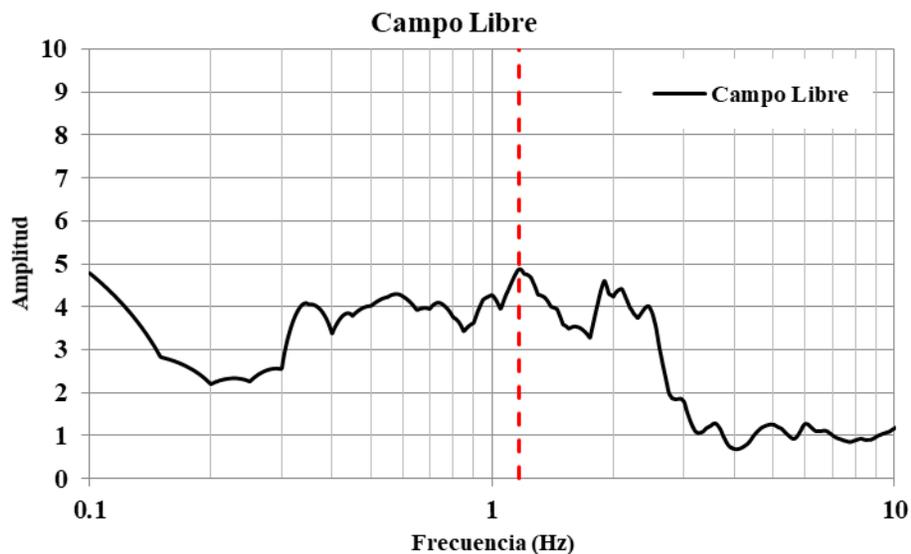


Figura 4.14. Función de transferencia empírica para determinar el período del suelo al aplicar la Técnica de Nakamura

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se determinaron las propiedades dinámicas estructurales del Edificio Lara Sosa, después de analizar los resultados obtenidos de las técnicas empleadas se llegaron a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Las primeras tres frecuencias identificadas en el Edificio Lara Sosa corresponden a los valores de 1.72Hz (0.59 s) para el primer modo en la dirección T, 3.54 Hz (0.29 s) para el segundo modo en la dirección L, así como 5.59 Hz (0.18 s) para el tercer

modo en torsión. Como se mencionó en el reporte, el movimiento del suelo influyó en la respuesta dinámica del edificio, ya que al quitar la interacción del suelo se obtuvo una frecuencia de 2.01 Hz (0.50 s) para el primer modo, 3.28 Hz (0.30 s) para el segundo modo y 5.78 Hz (0.17 s) para el tercer modo. Con excepción del segundo modo, los períodos del primer y tercer modo se redujeron al quitar el movimiento del suelo, lo cual indica que estos serían los períodos del edificio al estar sobre un suelo rígido, esto se debe tener en cuenta al calibrar el modelo numérico sobre suelo rígido; en caso de que se calibre el modelo sin quitar el movimiento del suelo a los períodos se debería considerar en el modelo la interacción del suelo.

Con respecto al amortiguamiento crítico se encontraron valores relativamente acordes a la geometría y a los elementos estructurales que restringen al edificio, tal es el caso del valor de amortiguamiento crítico en la dirección T que resultó ser mayor que en la dirección L; esto se debe a que en la dirección T es la parte más angosta de la estructura, además esta dirección es la de mayor amortiguamiento.

En las formas modales no se observaron irregularidades, resultaron ser las esperadas a los modos de traslación y al modo de torsión.

Por su parte el período del suelo (0.85 s) resultó estar alejado del primer modo de vibrar del edificio (0.59 s) lo cual debe de tomarse en consideración, ya que al paso del tiempo la estructura del edificio se va degradando y el suelo consolidando pudiendo llegar a coincidir ambos períodos; lo cual no es recomendable para la seguridad estructural del edificio.

De los análisis obtenidos en con los registros de 1990 a 2013 observamos que la estructura no ha sufrido daños ni degradación rápida de los materiales esto debido a que su periodo fundamental se mantiene sin cambios importantes en este periodo.

REFERENCIAS

Alcántara, L., Muriá, D., Almora, D., Velasco, J.M., Torres, M., Vázquez, R., Vázquez, E., y Macías, M. (2002), "Sistema de monitoreo remoto en un edificio localizado en una ciudad expuesta a un peligro sísmico mayor", Octavas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Valparaíso, Chile.

CENAPRED (1999), "*Curso sobre Diseño y Construcción Sismorresistente de Estructuras*".

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal RCDF (2004). "*Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*". Gaceta oficial del Distrito Federal, 6 de octubre de 2004.

Bendat, J. S. y Piersol, A. G. (1993). Engineering applications of correlation and spectral analysis. *New York: John Wiley and Sons.*

González, C. J. C. (2003). *Fundamentos del Análisis de Fourier*. Departamento de Enxeñería Eléctrica, Escola Técnica Superior de Enxeñeiros Industriais, Universidade de Vigo.

Kawasumi, H. y Shima, E. (1965). *Some applications of a correlator to engineering problems*. En Proceedings on the third world conference on earthquake engineering, pp. II298-II320.

Lermo, J., y Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America*, 83(5), 1574-1594.

Murià Vila, D. (2007). Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados. *México DF: Academia de Ingeniería, México.*

Rodríguez, M. (2005). Análisis modal operacional: Teoría y práctica. *Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, España*, pp. 63-87.

ANEXO A

Teoría del Análisis de Fourier

El principio del Análisis de Fourier es que toda función periódica puede representarse como una serie de funciones seno y coseno. Una señal periódica y continua en el tiempo, con período T , se puede representar mediante series de Fourier en la forma siguiente:

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_T t) + b_n \sen(n\omega_T t)] = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_T t - \theta_n) \quad (1)$$

donde:

$$\omega_T = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) dt \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos(n\omega_T t) dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \text{sen}(n\omega_T t) dt \quad (5)$$

$$c_0 = \frac{a_0}{2} \quad (6)$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (7)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (8)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots \quad (9)$$

De las expresiones anteriores ω_T es la frecuencia de la señal periódica que recibe el nombre de frecuencia fundamental. Por su parte a_n , b_n , C_n y θ_n son los coeficientes de la serie de Fourier que definen las senoides cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental. La componente de la serie de Fourier cuya frecuencia coincide con la fundamental ($n=1$) recibe el nombre de componente fundamental y el resto de las componentes se les llama componentes armónicas (González, 2003).

Para funciones no periódicas estas se expresan por medio de la Transformada de Fourier, aunque también esta última se puede aplicar a funciones periódicas.

Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es una operación matemática que transforma una señal en el dominio del tiempo a otra en el dominio de la frecuencia y viceversa (Rodríguez, 2005). La Transformada de Fourier de una función $x(t)$ está dada por la siguiente expresión:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (10)$$

A partir de las series de Fourier es posible representar una señal periódica de aceleración $x(t)$, con período T . De la función anterior se puede obtener una función no periódica cuando $T \rightarrow \infty$, entonces la Transformada de Fourier de la señal no periódica $x(t)$ queda de la siguiente manera:

$$X(f) = \int_{-\infty}^T x(t) e^{i2\pi ft} dt \quad (11)$$

La Transformada de Fourier es compleja, por lo cual se divide en una parte real y una parte imaginaria pudiéndose escribir como:

$$X(f) = \int_0^T x(t)\cos(2\pi ft)dt + i \int_0^T x(t)\sen(2\pi ft)dt \quad (12)$$

Por lo tanto, la Transformada de Fourier de un registro (señal de aceleración) obtenida de un punto de medición de una estructura, se representaría por la siguiente ecuación:

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi ft}dt \quad (13)$$

Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Para procesar las señales medidas de un sistema estructural se emplea un analizador digital. Este analizador digital muestrea las señales usando un convertidor analógico/digital, en un período de tiempo, con una relación de muestreo constante; es decir se tienen señales digitales discretas (con un número finito de valores). Como consecuencia la Transformada de Fourier no se puede aplicar directamente, ya que las señales asociadas a esta son continuas (con un número infinito de valores). Debido a lo anterior surge la Transformada de Fourier Discreta (DFT por sus siglas en inglés), la cual hace posible el Análisis de Fourier en sistemas digitales (González, 2003).

Las señales discretas son consecuencia del muestreo de señales continuas, a partir de una señal continua $x_c(t)$ se obtiene una secuencia de muestras x_k mediante la siguiente relación:

$$x_k = x_c(k\Delta t) \quad (14)$$

donde:

$$\Delta t = t_k - t_{k-1} \quad (15)$$

De la expresión anterior Δt es el período de muestreo y la frecuencia de muestreo que se define como el número de muestras por segundo se expresa con la siguiente ecuación:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad (16)$$

La DFT se puede expresar mediante la ecuación 17, donde N son los valores discretos $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\}$.

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (17)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$$

El proceso de muestreo se define en términos de una ventana que controla la longitud de la muestra. En términos generales el proceso de muestreo genera una señal que es producto de la señal original, de la ventana empleada y de la frecuencia de muestreo.

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) permite calcular la DFT y su inversa, es una versión más rápida de la DFT que puede ser aplicada cuando el número de muestras de la señal es una potencia de 2. El cálculo de la FFT toma aproximadamente $N \cdot \log_2(N)$ operaciones, en cambio la DFT toma aproximadamente N^2 , por lo tanto la FFT es más rápida. En ocasiones es útil emplear el relleno de ceros, es decir, agregar ceros al principio y/o al final de la señal. Esta adición no afecta al espectro de frecuencia de la señal. El relleno de ceros es una buena idea cuando la longitud de la señal no es una potencia de 2 (Rodríguez, 2005).

Una vez que se tienen las señales de vibración en el dominio de la frecuencia por medio de la FFT, es posible obtener los espectros de Fourier y potencia, las funciones de transferencia, coherencia y ángulo de fase para realizar el Análisis de Fourier; los espectros y funciones anteriores se describen a continuación.

ANEXO B

Imágenes de registros y análisis espectral

