

**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE  
SISTEMAS FÍSICOS EMPLEANDO TÉCNICAS DE  
VIBRACIÓN AMBIENTAL**

JOSE MIGUEL TRUJILLO LÓPEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Civil

Asesor: JUAN CARLOS BOTERO PALACIO

MEDELLÍN  
UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
2011

# CONTENIDO

	Página.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. PRELIMINARES .....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	18
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.4 MARCO TEÓRICO .....	19
1.4.1 CONCEPTO DE VIBRACIÓN .....	19
1.4.2 VIBRACIÓN AMBIENTAL .....	19
1.4.3 ANTECEDENTES.....	21
1.4.4 ESTUDIOS REALIZADOS EN COLOMBIA.....	24
2. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA.....	26
2.1 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN .....	26
2.2 ACELERÓMETROS.....	27
2.3 ESPECIFICACIONES DE UN ACELERÓMETRO .....	28
2.4 TIPOS DE ACELERÓMETROS .....	30
3. ANÁLISIS DE SEÑALES .....	33
3.1 REGISTRO Y TRATAMIENTO DE SEÑALES .....	33
3.1.1 CORRECCIONES DE LAS SEÑALES.....	35

3.1.2 FILTRADO DE SEÑALES .....	36
3.2 ANÁLISIS DE FOURIER.....	38
3.2.1 ESPECTRO DE FOURIER .....	39
3.2.1.1 EJEMPLO 1 .....	41
3.2.1.2 EJEMPLO 2 .....	43
3.2.1.3 EJEMPLO 3 .....	45
3.2.1.4 EJEMPLO 4 .....	48
4. METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	50
4.1 MÉTODO PROPUESTO .....	50
4.2 EQUIPO UTILIZADO EN LA MEDICIÓN.....	52
4.3 PRUEBA DE VIBRACIÓN FORZADA EN MESA VIBRATORIA.....	53
4.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS AMBIENTALES EN UN EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO .....	53
5. MODELO EN MESA VIBRATORIA.....	55
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA MESA .....	55
5.2 ENSAYOS REALIZADOS .....	56
5.2.1 ENSAYO No 1 .....	56
5.2.1.1 RESULTADOS.....	58
5.2.2 ENSAYO No 2 .....	62
5.2.2.1 RESULTADOS.....	62
6. PRUEBAS DE VIBRACION AMBIENTAL EN UN EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO .....	64
6.1 DESCRIPCION GENERAL DEL EDIFICIO .....	64
6.2 UBICACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICION .....	67
6.3 PRUEBA DE VIBRACION AMBIENTAL.....	68

6.3.1 RESULTADOS.....	69
7. CONCLUSIONES .....	72
8. AGRADECIMIENTOS.....	73
REFERENCIAS .....	74

## LISTA DE TABLAS

Página.

Tabla 1.1. Comparación entre los períodos de vibración dominantes de la estructura en las dos torres del puente basado en la instrumentación de diciembre 2007 y los obtenidos del modelo estructural (muñoz et al., 2008)..... 26

Tabla 2.1. Principales características de los diferentes tipos de acelerómetros y sus aplicaciones.....32

Tabla 6.1. Resumen de frecuencias y períodos encontrados.....72

## LISTA DE FIGURAS

	Página.
Figura 1.1. Frecuencia de la contribución de estudios al tema de vibración ambiental en estructuras: (a) edificios, presas, silos,... (b) puentes (Ivanovic et al., 2000).....	24
Figura 2.1. Sistema de monitoreo y control de vibración en computadora, a través de una tarjeta de adquisición de datos, acondicionamiento de señal y transductores (Pernia, 2004).....	28
Figura 2.2. Acelerómetro triaxial.....	29
Figura 3.1. Acelerograma del sismo de México 1985.....	35
Figura 3.2. Corrección de línea base del acelerograma del sismo de México ocurrido en 1985.....	36
Figura 3.3. Filtro digital Pasa Baja.....	38
Figura 3.4. Filtro digital Pasa Banda.....	38
Figura 3.5. Filtro digital Pasa Alta.....	38
Figura 3.6. Filtro digital Gaussiano.....	39

Figura 3.7. Filtro digital Eliminación de Banda.....	39
Figura 3.8. Espectro de amplitudes de Fourier en escala logarítmica para el acelerograma registrado en el sismo de México 1985.....	40
Figura 3.9. Procedimiento de cálculo para el Espectro de Amplitudes de Fourier (Botero, 2011).....	41
Figura 3.10. Generación del armónico sinusoidal en el programa de cómputo “Dinámica Estructural” (Botero, 2010).....	42
Figura 3.11. Espectro de Amplitudes de Fourier para el armónico sinusoidal generado.....	43
Figura 3.12. Generación del armónico cosenoidal en el programa de cómputo “Dinámica Estructural” (Botero, 2010).....	44
Figura 3.13. Espectro de Amplitudes de Fourier para el armónico cosenoidal generado.....	45
Figura 3.14. Generación del armónico a partir de la multiplicación de dos funciones seno con el programa de cómputo utilizado.....	46
Figura 3.15. Espectro de Amplitudes de Fourier para la señal generada a partir de la multiplicación de armónicos tipo seno.....	47
Figura 3.16. Armónico generado a partir de la suma de dos funciones.....	49

Figura 3.17. Espectro de Amplitudes de Fourier para la señal generada a partir de la suma de dos armónicos.....	50
Figura 4.1. Medición de las vibraciones del sistema físico con el acelerómetro CUSP-3C.....	52
Figura 4.2. Proceso realizado con pruebas de vibración ambiental para determinar propiedades dinámicas.....	52
Figura 4.3. Acelerómetro CUSP-3C.....	53
Figura 5.1. Mesa Vibradora del laboratorio de sismica de la Universidad EAFIT ...	57
Figura 5.2. Motor Diesel de la mesa vibradora.....	58
Figura 5.3. Gato Hidráulico que proporciona el desplazamiento a la mesa vibradora.....	58
Figura 5.4. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección X (Prueba No 1).....	60
Figura 5.5. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección Y (Prueba No 1).....	61
Figura 5.6. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección Z (Prueba No 1).....	62



Figura 5.7. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección X (Prueba No 2).....	63
Figura 6.1. Localización del bloque 18 dentro del campus universitario.....	65
Figura 6.2. Vista frontal (costado norte) del bloque 18.....	66
Figura 6.3. Planta típica del bloque 18.....	67
Figura 6.4. Vista lateral (costado occidental) del bloque 18.....	68
Figura 6.5. Ubicación en planta del acelerómetro en el piso 8 del edificio.....	69
Figura 6.6. Equipo de medición, registro y visualización de las señales.....	70
Figura 6.7. Espectro de Amplitudes de Fourier en dirección transversal.....	71
Figura 6.8. Espectro de Amplitudes de Fourier en dirección longitudinal.....	71

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología básica para identificar las propiedades dinámicas de sistemas físicos a partir de mediciones de vibración ambiental. Se hace una revisión bibliográfica del estado del arte y para ello se hace referencia a una serie de trabajos que se han publicado a nivel internacional. Se discute acerca de los diferentes tipos de pruebas que se pueden hacer en una estructura (Vibración ambiental, Vibración forzada, Vibración sísmica) así como también las características de los equipos utilizados en dichas mediciones. El proceso para el análisis de señales también es discutido, incluso se explica el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) para interpretar señales del dominio del tiempo en la frecuencia. Finalmente se hace la aplicación práctica en la mesa vibratoria de la universidad EAFIT y posteriormente en un edificio de concreto reforzado.

**Palabras clave:** Pruebas de vibración ambiental, propiedades dinámicas de sistemas físicos, acelerómetros, análisis de señales, transformada rápida de Fourier.

## **ABSTRACT**

This paper presents a basic methodology to identify dynamic properties of physical systems from measurements of vibration environment. We make a bibliographic review of the state of the art, and for this we will refer to a series of papers that have been published internationally. We discuss about the different types of tests that can be done in a structure (environmental vibration, forced vibration, Seismic vibration) as well as the characteristics of the equipment used in these measurements. The process of signal analysis is also discussed, including the explanation of the Fast Fourier Transform (FFT) to interpret signals in time frequency domain. Finally there is the practical application of the vibrating table in EAFIT University and then in a reinforced concrete building.

**Key Words:** Environmental vibration tests, dynamic properties of physical systems, accelerometers, signal analysis, Fast Fourier Transform.

## INTRODUCCIÓN

Recientes crisis sísmicas (Haití, 2010; Chile, 2010; Japón, 2011) han puesto en evidencia una vez más la enorme capacidad destructiva de los terremotos, los cuales solo necesitan de unos pocos segundos para mostrar toda su acción devastadora. Los efectos que estos fenómenos naturales producen en una determinada población, están condicionados en gran parte a la capacidad de las estructuras para responder ante tales eventos.

La respuesta de las estructuras está condicionada a la existencia de ciertas propiedades dinámicas (períodos, frecuencias, amortiguamientos, y formas modales), parámetros sobre los cuales se hace necesario indagar para saber que tan vulnerable es un determinado sistema estructural ante una excitación de carácter sísmico. Por lo tanto, de la calidad de los edificios en los cuales las personas residan o desarrollen sus labores, dependerán en gran medida los efectos que un terremoto pueda producir en una determinada población.

El aspecto de vulnerabilidad o comportamiento sísmico de edificios es el factor sobre el que puede actuarse hasta el punto de conseguir que los hogares se conviertan en lugares más seguros durante y después de la ocurrencia de un terremoto (Espinoza, 1999), reduciendo así el temor de un posible colapso. Por tal motivo, se hace necesario conocer, así sea por niveles básicos, las propiedades inherentes del comportamiento dinámico de las estructuras las cuales como ya se mencionó anteriormente influyen en la respuesta ante acciones dinámicas como por ejemplo un sismo.

La metodología de identificación de sistemas empleada en este trabajo es sencilla y rápida y puede determinar, en forma experimental, las propiedades dinámicas fundamentales de estructuras existentes. La metodología consiste en la realización de pruebas de vibración ambiental, las cuales describen el comportamiento lineal de las estructuras dado que las amplitudes de vibración son pequeñas.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar las propiedades dinámicas de un sistema físico empleando técnicas de vibración ambiental. Se entiende como sistema físico un agregado de objetos o entidades materiales, por ejemplo una estructura, o cualquier ente que posea masa, rigidez y pueda estar sujeto a vibraciones. Dentro de las propiedades dinámicas que se pueden encontrar están períodos fundamentales, frecuencias, amortiguamientos y formas modales. Un primer acercamiento a estas propiedades se logra mediante un modelo matemático, sin embargo, es importante anotar que en el diseño estructural se hacen ciertas suposiciones o hipótesis para lograr una aproximación al caso real. En vista de lo anterior pueden existir diferencias importantes entre el comportamiento predicho en el análisis y el que tiene la estructura construida.

Estos parámetros se pueden hallar mediante pruebas experimentales y de esta forma pueden ser utilizados para calibrar modelos matemáticos y como referencia para evaluar el comportamiento real del sistema.

# 1. PRELIMINARES

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sismos constituyen un problema de gran incertidumbre dentro de la ingeniería, puesto que su ocurrencia, magnitud, duración y contenido frecuencial solo son establecidos una vez que estos eventos han sucedido. Es quizás debido a su inesperada aparición y a su inusual fuerza destructiva, a la cual el ser humano no está acostumbrado a enfrentarse cotidianamente, que los sismos representen uno de los fenómenos naturales que más impacta a la humanidad.

Este enorme peligro para la sociedad civil, depende en gran medida de la amenaza sísmica, que se define como la probabilidad de manifestación de un sismo con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un período de tiempo (Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales, 2002), pero también depende de la vulnerabilidad de las estructuras, es decir, de su respuesta dinámica regulada por ciertos parámetros físicos (por ejemplo períodos, amortiguamientos, formas modales, entre otros), los cuales a su vez están involucrados en el diseño previo de dichas estructuras. El impacto de un sismo sobre una determinada población, está condicionado entonces por lo que se denomina riesgo, el cual se define como la amenaza sísmica por el nivel de vulnerabilidad de las estructuras para responder ante la ocurrencia de un sismo, es decir, el riesgo depende de dos variables que son amenaza y vulnerabilidad. Si alguna de ellas no existe el riesgo se puede interpretar como nulo.

En vista de lo anterior se hace necesario, conocer las propiedades dinámicas de las estructuras para poder prever cómo será su comportamiento ante diferentes

tipos de excitación y principalmente ante aquellos de gran amplitud de movimiento como los sismos, donde se puede presentar un fenómeno grave como es la combinación entre frecuencia y amplitud. Tal acercamiento al comportamiento dinámico de un edificio se puede lograr mediante dos formas, una modelación numérica o utilizando pruebas experimentales. El empleo de la primera técnica implica, en muchas ocasiones, que ante modelos de estructuras complejas se tengan que hacer ciertas suposiciones o hipótesis estructurales que ponen en juicio la confiabilidad de los resultados de la estructura debido a la incertidumbre que en el análisis se maneja. Dentro de tales suposiciones se destacan los efectos de interacción suelo-estructura, los efectos de torsión, la flexibilidad del diagrama de piso, la efectividad de las juntas constructivas, la participación de elementos no estructurales, el valor real de las cargas y las propiedades de los materiales. El no considerar o hacer suposiciones erróneas acerca la participación de estos aspectos estructurales puede conducir a estimaciones poco confiables de los periodos de vibración y amortiguamientos naturales de las edificaciones, parámetros importantes que gobiernan la respuesta dinámica de las mismas (Muriá-Vila y González, 1995). Por su parte en la segunda técnica se determinan las características dinámicas mediante pruebas experimentales a modelos estructurales y edificios en escala real, lo que brinda una buena aproximación al valor verdadero de las mismas.

En las pruebas experimentales se pueden definir tres diferentes tipos en función de la fuente de excitación empleada: pruebas de vibración ambiental, vibración forzada y pruebas sísmicas.

Las pruebas de vibración ambiental consisten en medir las vibraciones en las estructuras producidas por excitaciones de carácter ambiental, como son las generadas por el tránsito de vehículos, personas, maquinaria, viento, entre otros.

Estas pruebas son programadas, es decir, las mediciones pueden llevarse a cabo en cualquier momento sin necesidad de un monitoreo continuo y de que los equipos requeridos hayan tenido una localización fija desde un tiempo atrás. Es importante aclarar que en este tipo de pruebas se trabaja con vibraciones de muy baja amplitud.

Las pruebas de vibración ambiental son un método sencillo y rápido en la captura de datos, además no requiere que se detengan las actividades normales que se ejecutan en los inmuebles.

El método de vibración forzada consiste en utilizar un excitador mecánico como por ejemplo un motor de vibración para producir el movimiento del sistema físico. Este tipo de pruebas son programadas y con ellas se trata de excitar la estructura para la frecuencia de resonancia. Su aplicación resulta más compleja que las pruebas realizadas con vibración ambiental, ya que la interferencia en las actividades normales de una estructura se hacen necesarias y la inversión económica también es mayor.

El tercer método experimental mencionado, consiste en registrar los movimientos provocados por los sismos, por lo que tiene la ventaja de poder estudiar el comportamiento dinámico de edificios cuando estos se someten a amplitudes de excitación mucho mayores que las que se presentan con ruido ambiental. Este tipo de pruebas no son programadas y requieren un monitoreo continuo, lo que demanda una ubicación fija de los equipos de medición. La realización de este tipo de pruebas experimentales requiere una inversión mayor en tiempo y costo de equipo, por lo que su aplicación es sensiblemente más restringida que las pruebas



ambientales (Muriá-Vila y González, 1995). Los registros obtenidos con mediciones sísmicas requieren una interpretación más detallada, dado que al ocurrir daños, las señales se ven afectadas.

El presente trabajo utilizará como método de medición las pruebas de vibración ambiental, con las cuales se obtendrán los registros de vibración de un determinado sistema físico. Posteriormente se realizará el análisis de las señales obtenidas para encontrar finalmente las propiedades dinámicas del sistema en estudio.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El problema principal a resolver en este proyecto se concentra en la obtención de ciertos parámetros dinámicos que determinan la respuesta de las estructuras. Debido a que existen incertidumbres tanto en la excitación como en la estructura que se reflejan en los resultados obtenidos con la realización de modelos analíticos, se plantea entonces la necesidad de contar con técnicas experimentales que permitan un acercamiento más exacto a los valores reales. Dentro de los métodos experimentales empleados, uno de los más utilizados debido a sus ventajas en cuanto a fácil aplicación, inversión económica (si se compara por ejemplo con mediciones de vibración forzada y mediciones sísmicas) y gran obtención de datos, es el uso de la vibración ambiental, técnica muy útil para determinar frecuencias, amortiguamientos y formas modales los cuales dependen en gran medida de la amplitud de respuesta.

La importancia de este proyecto radica en que por medio del uso de técnicas de vibración ambiental, se podrá conocer aunque sea por niveles básicos, los

parámetros dinámicos que gobiernan la respuesta elástica de un determinado sistema físico, como por ejemplo una estructura. Además de hacer una revisión del estado del arte sobre lo que se ha hecho en cuanto al uso de esta técnica, se podrá establecer una metodología que sirva de base para futuras profundizaciones que se quieran hacer sobre el tema y con aplicaciones concretas en Colombia.

### **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las propiedades dinámicas de un sistema físico empleando técnicas de vibración ambiental.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una revisión del estado del arte en el tema del uso de vibración ambiental en estructuras.
- Evaluar las características de los diferentes equipos utilizados en la medición de vibración en estructuras.
- Definir el funcionamiento del equipo que será utilizado en las mediciones.
- Interpretar las señales obtenidas, en el dominio del tiempo y de la frecuencia.
- Validar los resultados de mediciones realizadas en una mesa vibratoria.
- Realizar pruebas en un edificio de concreto reforzado que permita evaluar propiedades dinámicas.

## **1.4 MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 CONCEPTO DE VIBRACIÓN**

Se dice que un cuerpo vibra cuando experimenta cambios alternativos, de tal modo que sus puntos oscilen sincrónicamente en torno a sus posiciones de equilibrio, sin que el campo cambie de lugar (Pernia, 2004). Las vibraciones en estructuras se dan como respuesta a las ondas generadas por diversas fuentes de excitación como por ejemplo un sismo, maquinaria, personas, vehículos, viento, entre otros. Estas fuentes perturban el estado de equilibrio estático y promueven una respuesta dinámica en el tiempo de las estructuras.

Las amplitudes de la vibración varían de acuerdo a la fuente perturbadora y al tipo de estructura, siendo por ejemplo las producidas por un sismo mucho mayores que las que puede producir el ruido ambiental.

Al estudiar el comportamiento dinámico de una estructura se puede realizar mediciones de las vibraciones con el fin de establecer las características dinámicas que gobiernan su respuesta. También puede ser un objetivo de tales mediciones, desarrollar técnicas que permitan reducir o mitigar las vibraciones en el caso de que estas sean excesivas. El tipo de medición, así como el equipo apropiado para llevarla a cabo, dependerá en gran medida de la fuente excitadora.

### **1.4.2 VIBRACIÓN AMBIENTAL**

La vibración ambiental se genera principalmente por uso normal de la estructura y se debe entre otras, al funcionamiento de máquinas industriales y tráfico de vehículos. También contiene vibraciones producidas por el viento.

Este tipo de vibraciones a las cuales una estructura está en constante exposición, utilizan el ruido como señal y las ondas que lo integran se llaman comúnmente microtemblores o microvibraciones. Fundamentalmente son vibraciones de muy baja amplitud y períodos comprendidos entre 0.1 y 10s (Espinoza, 1999).

Las pruebas de vibración ambiental describen el comportamiento lineal de la estructura, desde que las amplitudes de vibración sean pequeñas (Ivanovic et al., 2000). Por medio de estas pruebas se pueden calibrar modelos estructurales, realizar estudios de control en estructuras, identificar cambios de las frecuencias del sistema luego de ser sometidas a frecuencias bajas (ruido ambiental) y altas (sismo), y monitorear cambios en estructuras que han sido reparadas luego de haber sufrido algún daño estructural.

Otras aplicaciones de los estudios con vibración ambiental son:

*Control de Calidad de una obra.* Medición en edificios recién construidos para verificar los valores obtenidos (estos son por ejemplo períodos, frecuencias, amortiguamiento, entre otros) con datos teóricos utilizados en el diseño.

*Control de daños causados por un sismo.* Se realizan mediciones en estructuras luego de haber ocurrido un evento sísmico, esto con el fin de determinar que daños estructurales importantes han sido causados para repararlos. Es importante anotar en esta aplicación, que es necesario tener un previo registro antes de haber ocurrido el evento sísmico, para luego poder hacer las comparaciones necesarias.

*Variabilidad de la respuesta de edificaciones en diferentes condiciones de suelo.*  
Para una misma tipología estructural, se puede monitorear e identificar sus características dinámicas en diferentes condiciones de suelo.

### **1.4.3 ANTECEDENTES**

Aunque existen estudios realizados en California que datan de fechas anteriores a 1970 (Carder, 1936), el uso del ruido ambiental como técnica para caracterizar dinámicamente las estructuras, empieza a tener una regular aparición en los 70's con algunos estudios en edificaciones de acero y posteriormente en concreto reforzado (Trifunac, 1970a, 1970b; Udwadia y Trifunac, 1973). Es en los 70's donde se empieza a manifestar un gran interés por el uso de tal técnica y las ventajas que presenta con respecto al uso de otros métodos empiezan a ser más notables. Por ejemplo, Trifunac (1972) presenta un estudio en el cual compara los resultados de unas mediciones realizadas con vibración ambiental y vibración forzada en dos tipos de estructuras diferentes; un edificio de 22 pisos de acero y otro en concreto reforzado de 9 pisos. En dicho estudio, además de que se muestra los resultados obtenidos con ambas pruebas experimentales, se establecen importantes ventajas del uso de VA (vibración ambiental) con respecto al empleo de VF (vibración forzada) como por ejemplo la rapidez y facilidad de ejecución de la primera con respecto a la segunda y que además una prueba con VA requiere menos inversión económica que una medición con VF.

A partir de 1980 se empieza a dar un aporte considerable al tema de estudio de vibración ambiental, puesto que la aplicación a otro tipo de estructuras como puentes empieza a tomar una mayor fuerza. Por ejemplo, Higashihara et al. (1987) estudian el comportamiento de un puente, en el cual miden las propiedades dinámicas del anclaje por medio de la medición in situ con vibraciones ambientales.

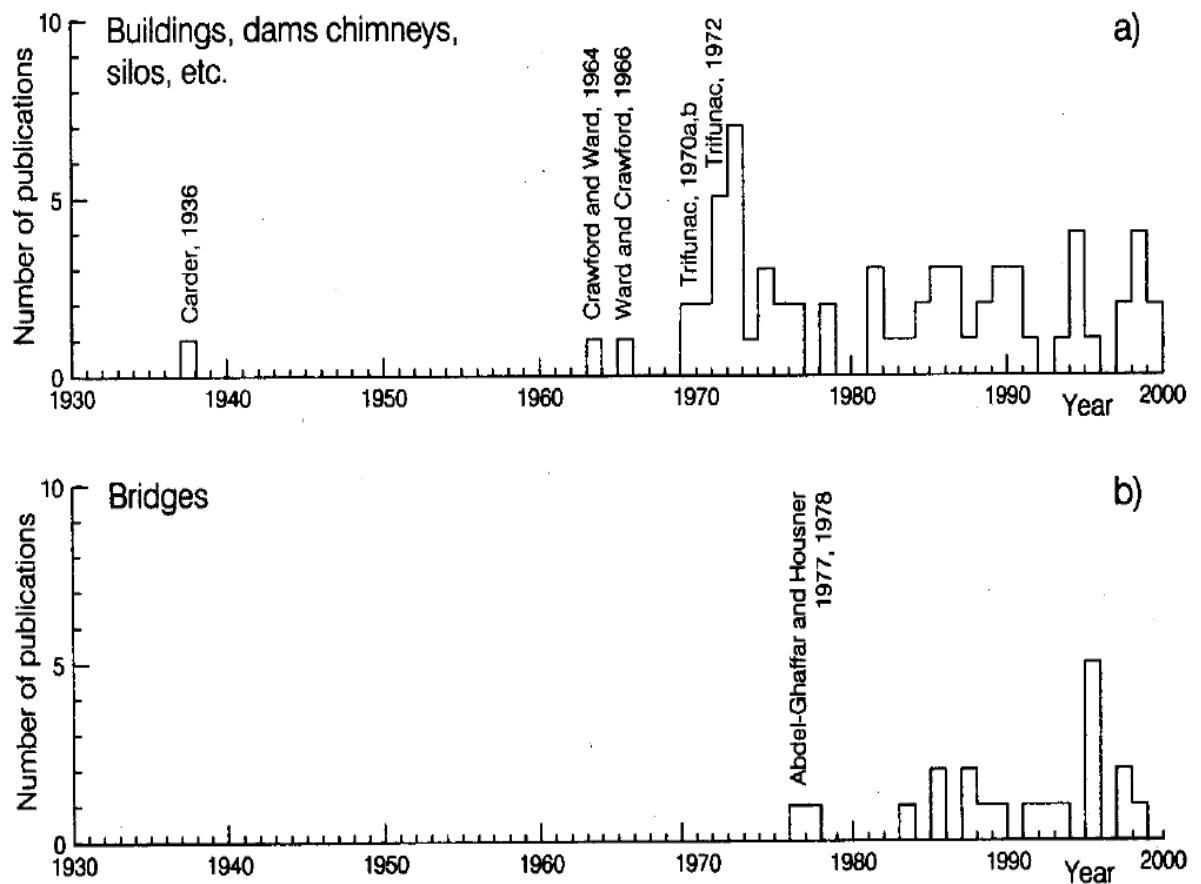
Previo a los estudios de Higashihara, Abdel-Ghaffar y Housner (1977) ya habían realizado pruebas experimentales sobre el puente Vincent Thomas, una extensa estructura colgante de 460m que cruza el Puerto de Los Angeles y que está ubicado en California. En este estudio se determinaron las frecuencias naturales y forma modales de vibrar vertical, lateral y torsional de la estructura mediante pruebas de vibración ambiental.

En realidad la aplicación del método ha sido muy diversa, incluso se han realizado mediciones en monumentos históricos como iglesias donde el objetivo principal es determinar la vulnerabilidad sísmica de dichas estructuras (Nigbor et al., 1992).

El método ha sido empleado puentes vehiculares (Abdel-Ghaffar y Housner, 1977; Higashihara et al., 1987; Brownjohn et al., 1987; Boroschek et al., 2003; Ren et al., 2004), en puentes peatonales (Rojas et al., 2005), en distribuidores viales (Muriá-Vila y Sanchez, 2005), en hospitales (Boroschek y Astroza, 1998; Mendoza et al., 1991), en viviendas de uno y dos pisos (Carrillo, 2009), en plantas nucleares (Luz et al., 1983), en presas (Abdel-Ghaffar et al., 1980) y la mayor aplicación se ha dado en edificios, entre ellos están Carydis y Mouzakis (1986), Muriá-Vila y González (1995), Beck et al. (1995), Miranda y Bertero (1993), Marshall et al. (1994), Celebi y Safak (1992), Muriá-Vila y Moreno (1993), Espinoza (1999) y, Huerta et al. (2009).

Los estudios en estructuras con VA han logrado una importante evolución y es un tema ampliamente estudiado por países como México, España, Chile, Estados Unidos, Japón, entre otros.

Ivanovic et al. (2000), además de los resultados obtenidos de mediciones realizadas con VA en un edificio de 7 pisos de concreto reforzado en Van Nuys California, presenta una revisión de la literatura en el tema de vibración ambiental que se tenía hasta la fecha y en tal trabajo muestra una gráfica interesante de la evolución de los estudios en diferentes tipos de estructuras con VA (vibración ambiental). Dicha gráfica que aparece a continuación (Figura 1.1), muestra el progreso de los estudios con VA desde 1930 hasta el año 2000.



**Figura 1.1. Frecuencia de la contribución de estudios al tema de vibración ambiental en estructuras: (a) edificios, presas, silos,... (b) puentes (Ivanovic et al., 2000)**

#### **1.4.4 ESTUDIOS REALIZADOS EN COLOMBIA**

Aunque el uso de la técnica de vibración ambiental como método para caracterizar dinámicamente las estructuras se ha desarrollado poco en Colombia, hay estudios interesantes que indican un arranque positivo en el empleo de esta metodología.

En edificios, García (2006) hace referencia de un estudio importante realizado por la firma ICOSA (Industrial de construcciones S.A) en la ciudad de Bogotá. García (2006) menciona que en ese trabajo se realizaron una serie de ensayos a un edificio prefabricado de cinco pisos, conformado por un sistema estructural de paneles y losas. Dentro los ensayos realizados, se incluyeron pruebas de vibración ambiental con las cuales se pudo determinar el periodo de vibración de la edificación.

En la parte de puentes se tiene como referencia dos interesantes trabajos realizados por Muñoz et al. (2008, 2010). En un primer estudio, Muñoz et al. (2008) muestran los resultados de un trabajo de vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga basado en confiabilidad estructural de un puente de acero en Cajamarca (Tolima). Dicho estudio fue llevado a cabo dentro de un convenio de colaboración Universidad-Empresas-Gobierno Nacional. Además de pruebas de cargas se realizó una determinación de las propiedades dinámicas (frecuencias naturales, períodos predominantes y rigidez) del puente a través de mediciones de las vibraciones ambientales. Se obtuvieron resultados interesantes como la comparación de los períodos fundamentales de la estructura obtenidos con las mediciones experimentales (vibración ambiental) y los calculados a partir de un modelo analítico (Tabla 1.1).



Un estudio similar al anterior fue llevado a cabo por Muñoz et al. (2010) pero esta vez en un puente atirantado, el viaducto llamado Cesar Gaviria Trujillo. Esta estructura está ubicada en el occidente de Colombia y une las ciudades de Pereira y Dosquebradas a través del río Otún. Uno de los componentes de los ensayos realizados fueron las pruebas de vibración ambiental, en las cuales solo se incluyó la determinación de períodos y frecuencias predominantes de la estructura del puente, ya que otras propiedades como amortiguamiento y formas modales se dejaron proyectadas para futuras investigaciones en la misma estructura.

**Tabla 1.1. Comparación entre los períodos de vibración dominantes de la estructura en las dos torres del puente basado en la instrumentación de diciembre 2007 y los obtenidos del modelo estructural (Muñoz et al., 2008)**

	Torre de Cajamarca			Torre de Ibaque		
	Experimental		Modelo estructural	Experimental		Modelo estructural
	Frecuencia(Hz)	Periodo(Seg)	Periodo(Seg)	Frecuencia(Hz)	Periodo(Seg)	Periodo(Seg)
	Sentido transversal			Sentido transversal		
1	0,6	1,67	1,58 ( 5%)*	0,61	1,64	1,58 ( 4%)*
2	1,06	0,94		0,86	1,16	
3	1,43	0,70		1,13	0,88	
	Sentido longitudinal			Sentido longitudinal		
1	0,9	1,11	1,36(23%)*	0,9	1,11	1,36(23%)*
2	1,46	0,68		1,5	0,67	
3	1,94	0,52		1,94	0,52	

\* Diferencial porcentual entre lo experimental y lo analítico

## 2. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

### 2.1 MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN

La medición de la vibración se puede definir como el estudio de las oscilaciones mecánicas de un sistema dinámico cuando éste es sometido a algún tipo de excitación. Las mediciones de las vibraciones deben ser hechas con la finalidad de producir los datos necesarios, para realizar significativas conclusiones del sistema bajo prueba (Pernia, 2004). Tales datos que caracterizan la vibración de la estructura en un punto, pueden representar la historia temporal de desplazamiento  $x(t)$ , de la velocidad  $\dot{x}(t)$  o de la aceleración  $\ddot{x}(t)$ .

Los transductores de vibración son empleados para medir el desplazamiento lineal, velocidad y también aceleración de sistemas sometidos a vibración. Estos transductores convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que quiere decir que producen una señal eléctrica la cual está en función de la vibración. Existen entonces transductores de aceleración, velocidad y desplazamiento que pueden ser usados en conjunto con un sistema de adquisición de datos. Un sistema de medición y procesamiento de señales de vibración por computadora típico puede ser observado en la figura 2.1.

Para estudios sísmicos se emplean transductores de aceleración llamados acelerómetros, los cuales a partir de una señal de entrada permiten obtener la respuesta de la estructura en términos de la aceleración.



**Figura 2.1. Sistema de monitoreo y control de vibración en computadora, a través de una tarjeta de adquisición de datos, acondicionamiento de señal y transductores (Pernia, 2004)**

En un estudio sobre instrumentación para campo cercano y análisis de acelerogramas, Roca (1989) manifiesta que el registro sísmico se hace generalmente con acelerómetros, ya que un registro de desplazamiento exigiría la utilización de instrumentos de rango dinámico muy grande. Además, usualmente es más fácil obtener velocidades y desplazamientos a partir de registros de aceleración (integración numérica), que efectuar el proceso inverso de derivación.

## **2.2 ACCELERÓMETROS**

La medición de las amplitudes causadas por eventos sísmicos son llevadas a cabo gracias a la utilización de ciertos dispositivos digitales denominados acelerómetros, los cuales son instrumentos que permiten medir la aceleración asociada a la vibración del movimiento de una estructura. Estos dispositivos convierten la aceleración en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, en este caso la estructura sometida a vibración. Esta señal indica en tiempo real, la aceleración instantánea de la estructura sobre la cual el acelerómetro está ubicado.

Los acelerómetros miden la aceleración en fracción de “g”. Un g ( $981 \text{ cm/s}^2$ ) se define como la fuerza gravitacional de la tierra aplicada sobre un objeto o persona (Pernia, 2004).

Los acelerómetros son direccionales, lo que quiere decir que solo miden aceleración en una dirección. Para poder medir la aceleración en tres dimensiones, se utilizan acelerómetros triaxiales (ejes x,y,z), los cuales son ortogonales (Figura 2.2).



**Figura 2.2. Acelerómetro triaxial**

Los acelerómetros tienen diversas aplicaciones, estos se pueden utilizar para medir la vibración de los autos, las máquinas, los edificios, sistemas de control de proceso y las instalaciones de seguridad. También son ampliamente utilizados en mediciones sísmicas.

### **2.3 ESPECIFICACIONES DE UN ACCELERÓMETRO**

**Número de ejes:** indica las direcciones en las cuales se pueden realizar mediciones. En el mercado se pueden encontrar acelerómetros de dos ejes o de tres (triaxiales) y su elección dependerá de las necesidades de la medición.

**Rango Dinámico:** es la diferencia entre los límites superior e inferior de aceleración, dentro del cual el acelerómetro responde linealmente. Normalmente se especifica en fracción de “g” (gravedad).

**Frecuencia de respuesta:** es el rango de frecuencias donde la salida del acelerómetro se encuentra dentro de una desviación especificada, generalmente es de  $\pm 5$  por ciento.

**g:** 1g es la aceleración de la gravedad de la tierra, que es de  $32,2 \text{ ft/s}^2$ ,  $386 \text{ in/s}^2$  ó  $9.81 \text{ m/s}^2$

**Límite de alta frecuencia:** es la frecuencia donde la salida supera la desviación de salida indicada. Normalmente se rige por la resonancia mecánica del acelerómetro.

**Frecuencia baja de corte:** es la frecuencia donde la salida comienza a caer por debajo de la precisión establecida. La salida no desaparece, pero la sensibilidad disminuye rápidamente con frecuencias bajas.

**Ruido:** el ruido electrónico es generado por el circuito amplificador. El ruido puede ser especificado de banda ancha (que se especifican en el espectro de frecuencias) o del espectro designado en frecuencias específicas. Los niveles de ruido se especifican en fracción de “g” ( $\text{cm/s}^2$ ). El ruido generalmente disminuye a

medida que aumenta la frecuencia de lo que el ruido a bajas frecuencias es más un problema que a altas frecuencias.

**Frecuencia de resonancia:** es la frecuencia con la que el sensor entra en resonancia. Se requiere que las medidas de frecuencia estén por debajo de la frecuencia de resonancia del acelerómetro.

**Sensibilidad:** es la salida eléctrica por unidad de aceleración. Se puede expresar como sensibilidad de carga [C/g] o como sensibilidad de voltaje [V/g].

**Sensibilidad de temperatura:** es la salida de voltaje por grado de temperatura medida. Los sensores son de temperatura compensada para poder mantenerse dentro de los límites especificados ante cambios de temperatura.

**Rango de temperatura:** está limitado por el circuito microelectrónico que convierte la carga a una salida de baja impedancia. Normalmente el rango es de -50 a 120C.

## 2.4 TIPOS DE ACELERÓMETROS

En el mercado existen diferentes tipos de acelerómetros, cada uno de ellos utilizado para ciertos propósitos determinados. Se tiene por ejemplo acelerómetros mecánicos, que son los más simples y solo utilizan una masa inerte y resortes elásticos; acelerómetros piezoeléctricos y piezoresistivos, los cuales son los más

utilizados para medición de vibraciones; acelerómetros capacitivos, muy útiles para usos industriales y acelerómetros micro-mecánicos (MEMS). Estos últimos han sido desarrollados como sensores de impacto en los sistemas de airbag, en sistemas antibloqueo de frenos o en cual otro sistema de medición de impacto.

La elección del acelerómetro apropiado para realizar una medida de aceleración, depende de las características del sensor: márgenes de valores de aceleración que admite, capacidad para medir en continua o sólo en alterna, la máxima frecuencia a la que puede trabajar, los parámetros característicos del sensor, entre otros (Gonzalo, 2004).

En la tabla 2.1, se resumen las principales características de los distintos acelerómetros, así como también se presentan sus aplicaciones.

**Tabla 2.1. Principales características de los diferentes tipos de acelerómetros y sus aplicaciones**

TIPO	MARGEN DE MEDIDA	ANCHO DE BANDA(Hz)	VENTAJAS E INCONVENIENTES	APLICACIONES
MEMS	1.5 a 250g	0.1 a 1500	-Alta sensibilidad -Costo medio -Uso sencillo -Bajas temperaturas	-Impacto -ABS -Airbag -Uso en automoción

Piezoeléctricos	0 a 2000g	10 a 20000	-Sensibilidad media -Uso complejo -Bajas temperaturas -No funcionan en continua	-Vibración -Impacto -Uso industrial
Piezo-resistivos	0 a 2000g	0 a 10000	-Respuesta en continua y alterna -Prestaciones medias -Costo bajo -Tamaño y peso mínimo -Alta sensibilidad	-Vibración -Impacto -Automoción -Biodinámica -Ensayos en vuelo -Test en túneles de viento
Capacitivos	0 a 1000g	0 a 2000	-Funciona en continua -Bajo ruido -Baja potencia -Excelentes características -Costo bajo	-Uso general -Uso industrial -Sistemas de alarma y seguridad -Mediciones sísmicas
Mecánicos	0 a 200g	0 a 1000	-Alta precisión en continua -Lentos- -Costo alto	-Navegación Inercial -Guía de misiles -Herramientas -Nivelación





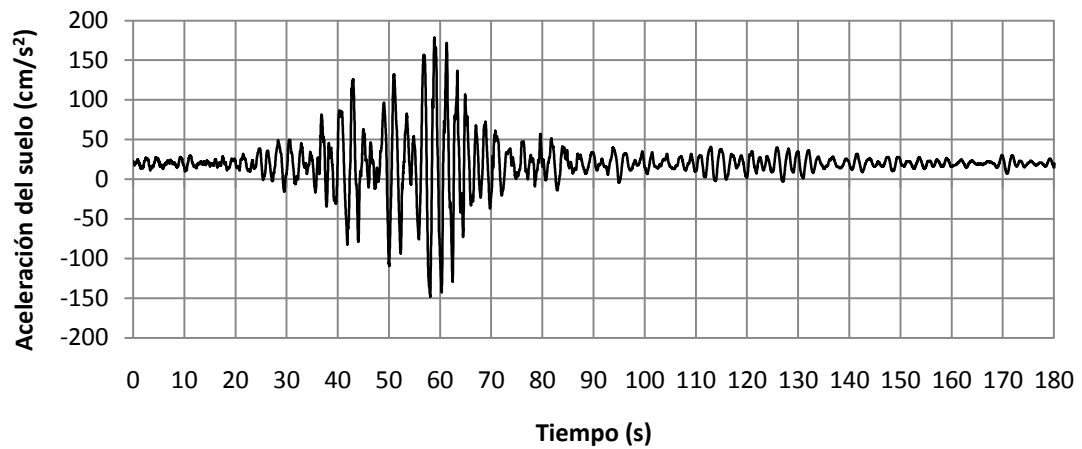
### **3. ANÁLISIS DE SEÑALES**

#### **3.1 REGISTRO Y TRATAMIENTO DE SEÑALES**

Una señal se define como la historia de los valores de aceleración que mide un acelerómetro en determinado tiempo para un punto específico. El estudio de este tipo de registros es motivado por el interés de conocer las características del movimiento al cual son sometidas las estructuras cuando ocurre un evento sísmico, esto a su vez se hace con el fin de establecer metodologías para la evaluación de riesgo sísmico y desarrollo de las normas de construcción sismo resistente. En general con un estudio de señales se trata de reproducir el movimiento del suelo o del punto de la estructura donde se halla el instrumento con la mayor precisión posible, a partir del registro obtenido.

Con el fin de obtener lo más exacto posible un registro de los valores de aceleración que se han producido durante el movimiento de una estructura en el lugar de registro, es necesario realizar un cuidadoso tratamiento de las señales. Puesto que los datos que se recopilan en campo se encuentran en un formato original propio del acelerógrafo (binario), será necesario hacer una conversión de los mismos a formato ASCII con el que generalmente se trabaja (Carreño et al., 1999).

La señal obtenida presenta una serie de errores que es necesario corregir para que dicha señal sea apta para ser utilizada. En la figura 3.1, se puede ver un registro de aceleraciones sin corregir del sismo de México ocurrido en 1985.



**Figura 3.1. Acelerograma del sismo de México 1985**

Si se examina la figura anterior (Figura 3.1), se puede ver claramente que la señal se encuentra desfasada con respecto al eje de ceros. Para corregir este error se realiza un procedimiento conocido como corrección de línea base.

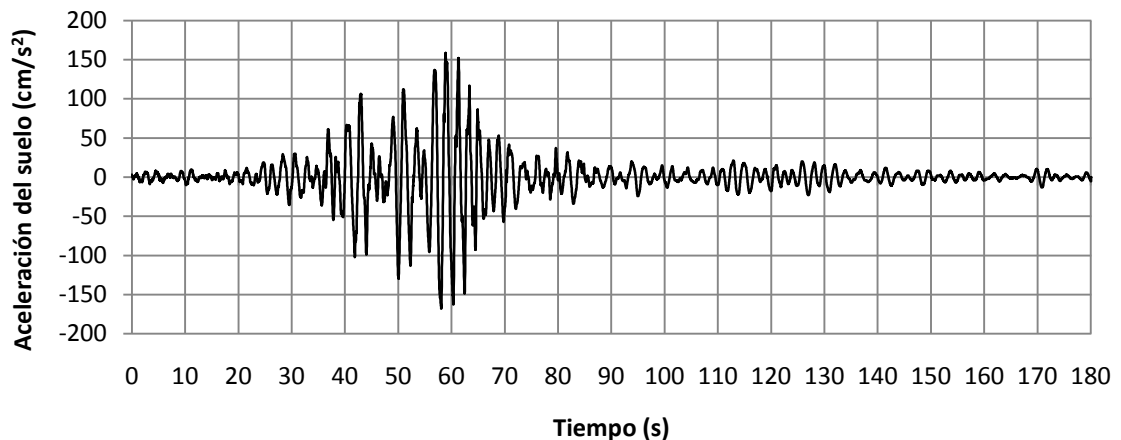
El análisis de señales incluye generalmente las siguientes partes:

- Corrección instrumental: convolución del registro con la función de transferencia del instrumento.
- Corrección de línea base.
- Filtrado paso bajas.
- Filtrado paso altas.
- Análisis de Fourier.

### 3.1.1 CORRECCIONES DE LAS SEÑALES

**Corrección instrumental:** Consiste en la convolución del registro con la función de transferencia del equipo de medición. Para hacer efectiva esta corrección se debe conocer las constantes de calibración del equipo, como son la sensibilidad del acelerómetro, la frecuencia natural y el amortiguamiento.

**Corrección de línea base:** En ciertas ocasiones puede ocurrir que el acelerómetro no esté correctamente nivelado en el punto de ubicación o que el sistema de registro provoque una desviación de los datos respecto a la línea base, esto hace que señal quede desplazada respecto a la línea de ceros. El proceso de corrección de línea base se realiza con el fin de evitar la desviación de los acelerogramas respecto al centro, aplicando al acelerograma una corrección punto a punto igual al promedio aritmético del registro (Flórez y Lozano, 2007). La figura 3.2 muestra esta corrección realizada sobre el acelerograma mostrado en la figura 3.1.



**Figura 3.2. Corrección de línea base del acelerograma del sismo de México ocurrido en 1985**

### 3.1.2 FILTRADO DE SEÑALES

Los filtros digitales son funciones matemáticas que multiplican cualquier señal expresada en función de la frecuencia, con el fin de eliminar algún contenido frecuencial que es ajeno a la señal (Botero, 2011). El proceso de filtrado es una operación computacional de modificación de la señal de entrada, empleado para remover las componentes frecuenciales no deseadas de dicho registro.

El filtrado de una señal se hace necesario cuando se quiere limitar la información a una banda de frecuencias deseada, evitando de esta manera contener información adicional de menores o bajas frecuencias que pueden ocasionar un gran número de errores y que son debidas a fenómenos como interferencias, ruido u otras señales. La tipología de errores que se puede presentar en una señal, puede ser consultada en Carreño et al. (1999).

Existe una gran variedad de filtros digitales, a continuación se muestran una serie de filtros muy utilizados en la práctica de análisis de señales (Botero, 2011):

- 1) **Filtro Pasa Baja:** Permite el paso de bajas frecuencias y elimina todas las superiores a una frecuencia dada.

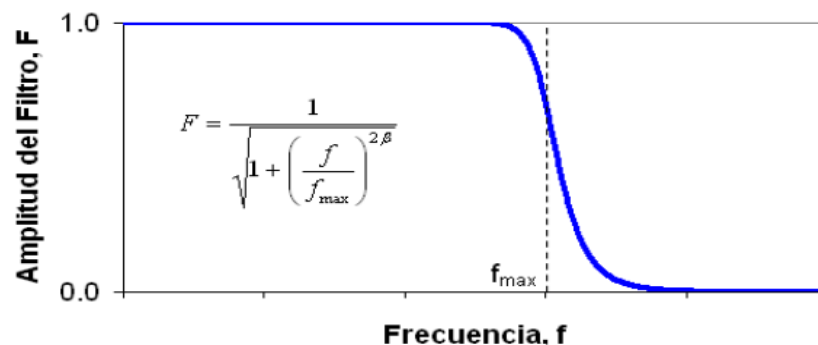


Figura 3.3. Filtro digital Pasa Baja.

2) **Filtro Pasa Banda:** Permite el paso de un rango intermedio de frecuencias.

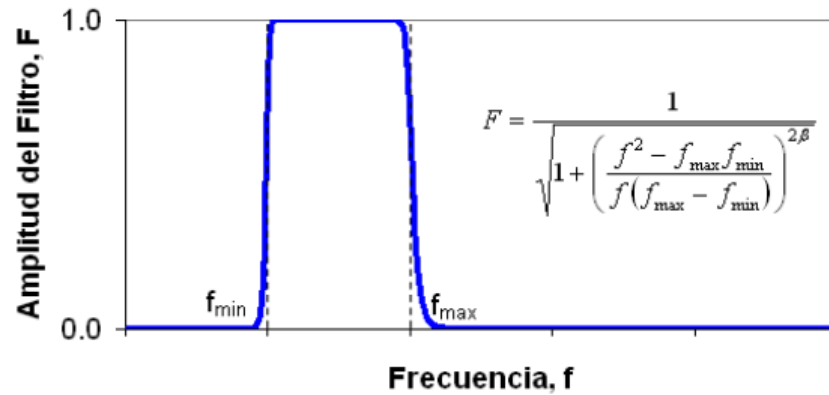


Figura 3.4. Filtro digital Pasa Banda.

3) **Filtro Pasa Alta:** Permite el paso de altas frecuencias y elimina todas las frecuencias inferiores a una dada.

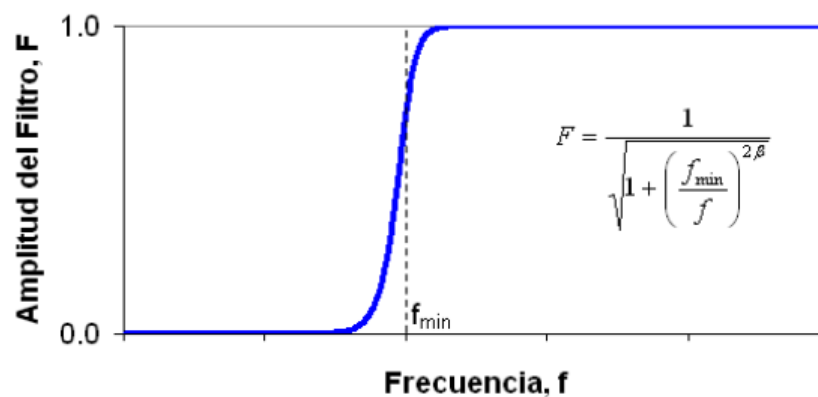


Figura 3.5. Filtro digital Pasa Alta.

4) **Filtro Gaussiano:** Permite el paso de un rango intermedio de frecuencias, empleando una curva similar a la que define la campana de Gauss. El efecto es similar al filtro pasa banda, pero la curva es mas suavizada.

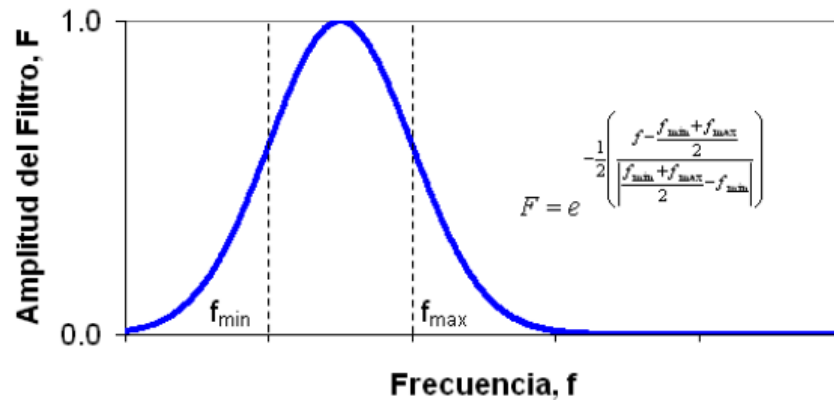


Figura 3.6. Filtro digital Gaussiano.

- 5) **Filtro Eliminación de Banda:** Permite el paso de altas y bajas frecuencias, y elimina las frecuencias intermedias.

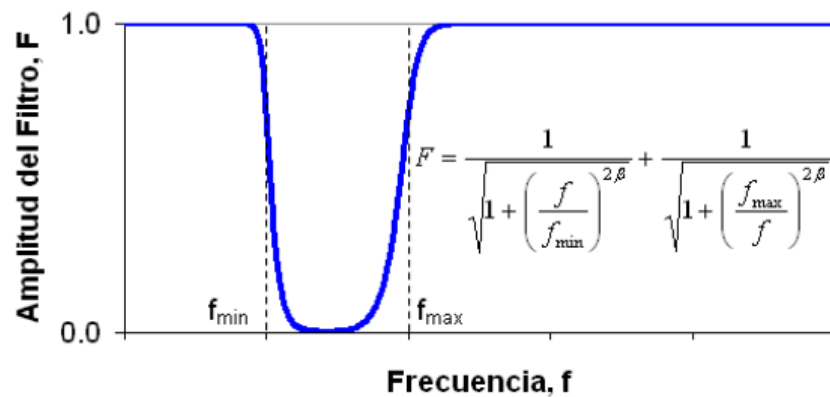


Figura 3.7. Filtro digital Eliminación de Banda.

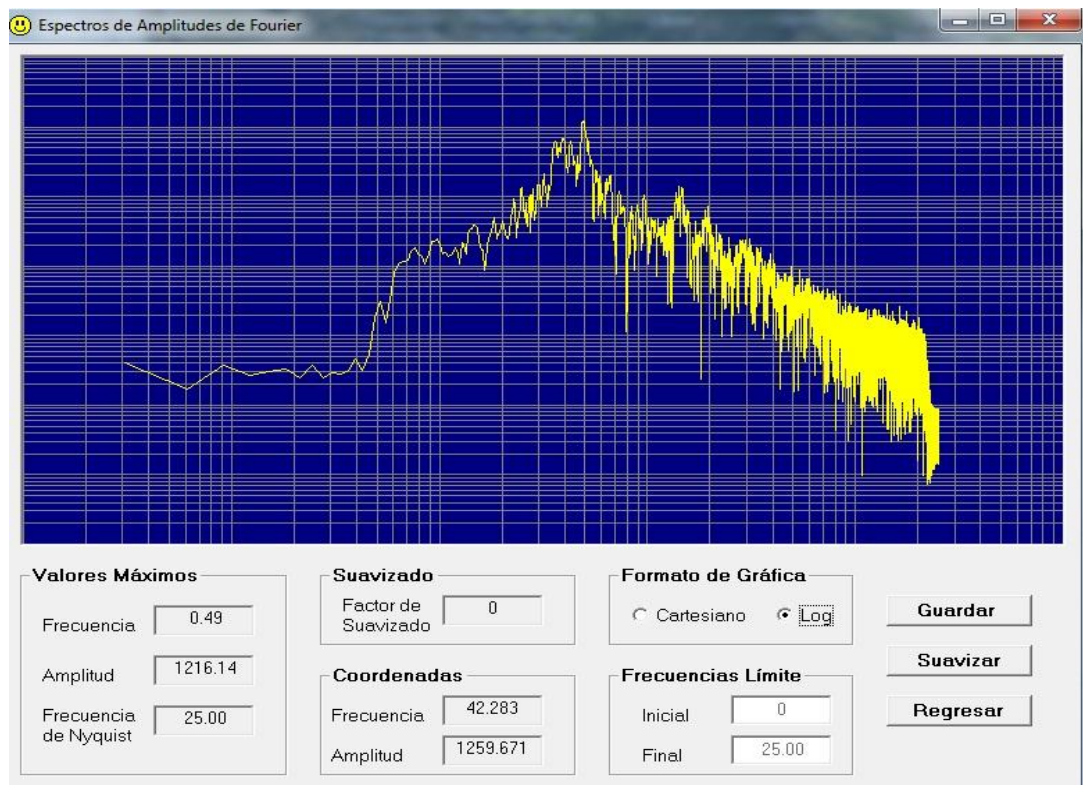
### 3.2 ANÁLISIS DE FOURIER

Una vez que el registro temporal de aceleraciones ha sido corregido adecuadamente para su posterior utilización, se hace necesario un análisis del contenido frecuencial de la señal para determinar frecuencias o períodos predominantes. Este proceso se puede hacer mediante la utilización del espectro

de Fourier, el cual constituye una metodología de análisis en el dominio de la frecuencia.

### 3.2.1 ESPECTRO DE FOURIER

El espectro de Fourier es una herramienta matemática valiosa que proporciona un amplio conocimiento acerca de las frecuencias contenidas en la señal. Gracias a la utilización de esta metodología, es fácil visualizar para cada período de oscilación de la señal, una amplitud máxima correspondiente. En la figura 3.8 se puede observar el espectro de amplitudes de Fourier para el sismo de México en 1985 calculado con el programa de cómputo de Dinámica Estructural (Botero, 2010).



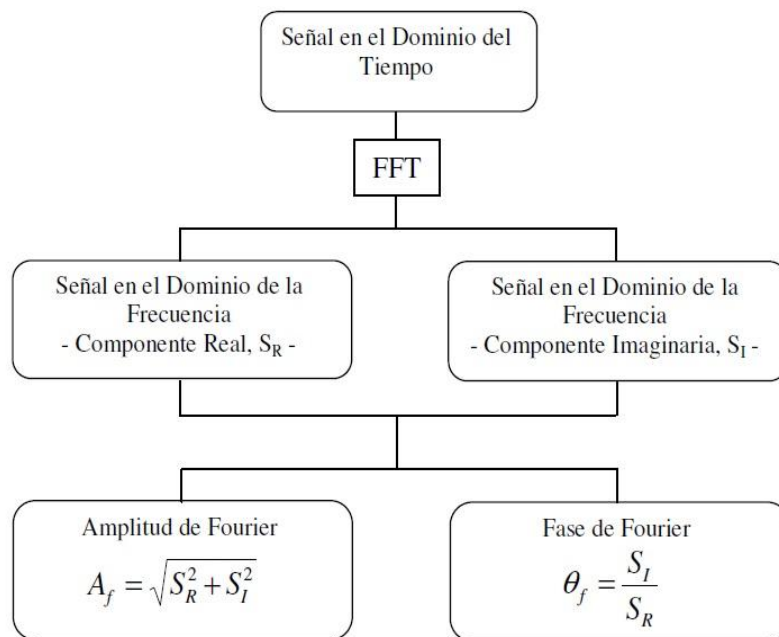
**Figura 3.8. Espectro de amplitudes de Fourier en escala logarítmica para el acelerograma registrado en el sismo de México 1985**



Un adecuado análisis del espectro de amplitudes de Fourier puede brindar información acerca de los períodos presentes en la señal. Además siguiendo esta misma metodología, se puede encontrar cual es el período o frecuencia dominante, dato en el cual el espectro presenta su mayor pico.

Para calcular el espectro de amplitudes de Fourier de una señal definida en el dominio del tiempo, se recurre a una herramienta computacional llamada la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT). Este es un algoritmo utilizado en el procesamiento de señales que permite calcular la transformada de Fourier y su inversa y fue propuesto por Cooley y Tukey (1965).

El procedimiento para el cálculo del espectro de amplitudes de Fourier se presenta en la figura 3.9.



**Figura 3.9. Procedimiento de cálculo para el Espectro de Amplitudes de Fourier (Botero, 2011)**

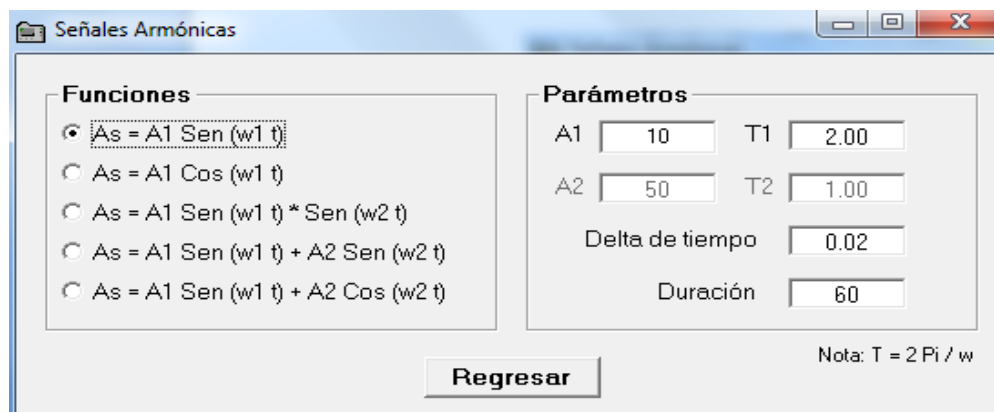
Una explicación más detallada para el cálculo del espectro de Fourier empleando la FFT, puede ser consultada en Botero (2011).

Como se mencionó anteriormente una de las mayores aplicaciones del espectro de amplitudes de Fourier, es que para cada periodo de oscilación presente en la señal, se encuentra una frecuencia y una amplitud característica de la onda representante de tal periodo.

Para entender mejor esta aplicación se procede a continuación a realizar una serie de ejemplos utilizando el programa de Dinámica Estructural (Botero, 2010).

### 3.2.1.1 EJEMPLO 1

Se genera primero un armónico de tipo sinusoidal (Figura 3.10) y se nota que el periodo presente en la señal, se evidencia por medio de su frecuencia característica en el espectro de Fourier.



**Figura 3.10. Generación del armónico sinusoidal en el programa de cómputo “Dinámica Estructural” (Botero, 2010)**

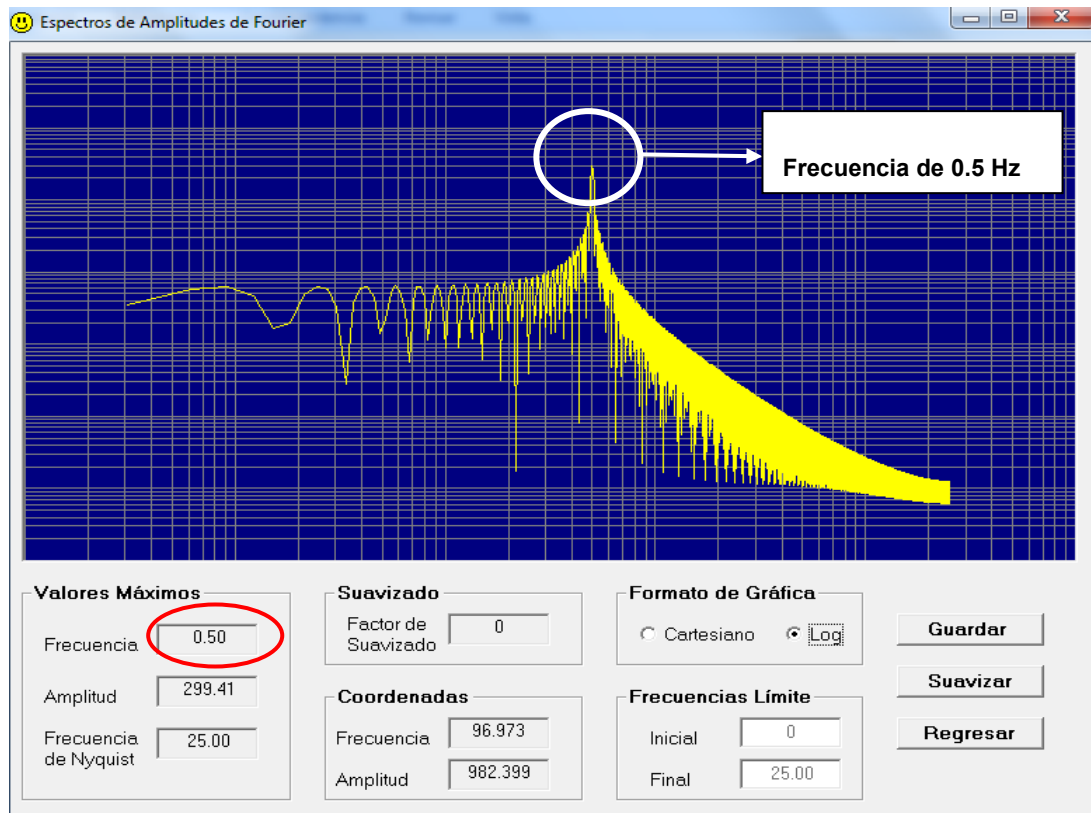
Si se observa la función se tiene que para un periodo de 2s, la frecuencia correspondiente será:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

Por lo tanto;

$$f = \frac{1}{2s} = 0.5 \text{ Hz}$$

Ahora se procede al cálculo del espectro de amplitudes de Fourier (Figura 3.11) para la señal armónica generada utilizando el programa de cómputo mencionado.



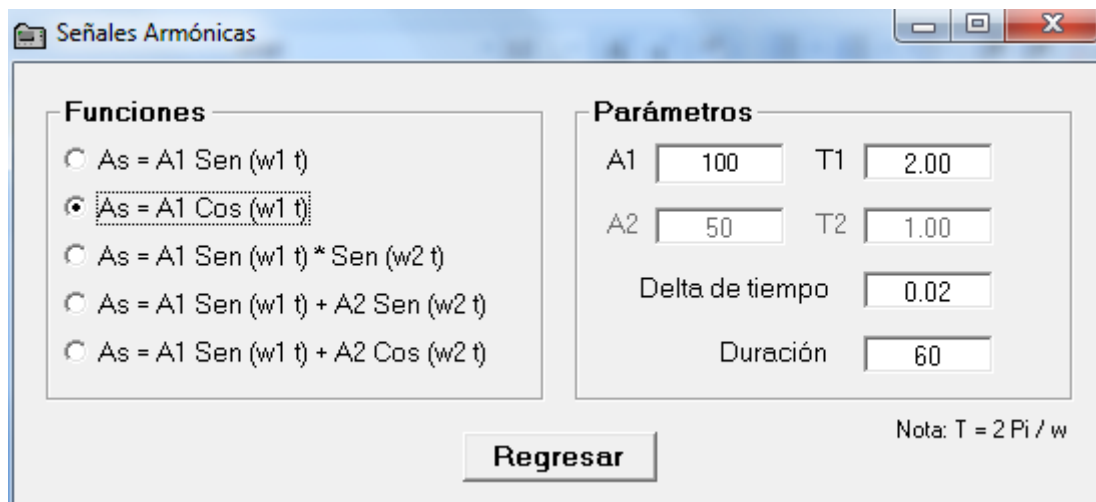
**Figura 3.11. Espectro de Amplitudes de Fourier para el armónico sinusoidal generado**

En dicho espectro se puede observar que la amplitud mayor se evidencia por medio de un pico alto en el espectro de Fourier. Para dicho pico, se encuentra que la frecuencia representa el período de la onda generada con el armónico sinusoidal.

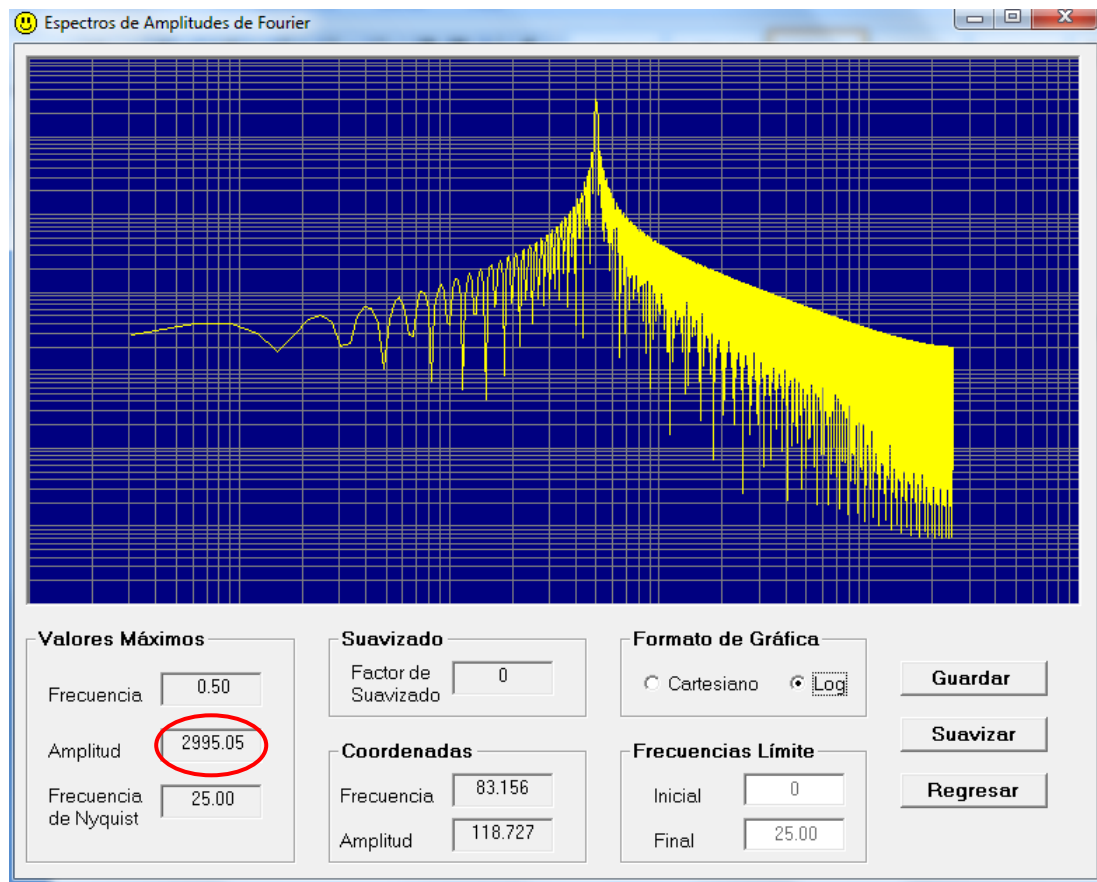
Si en vez de haber generado un armónico tipo sinusoidal, se hubiese utilizado uno de tipo cosenoidal con las mismas condiciones ( $A_1$  y  $T_1$ ), los resultados no hubiesen presentado variación alguna y la frecuencia predominante encontrada sería la misma.

### 3.2.1.2 EJEMPLO 2

Ahora se genera un armónico de tipo cosenoidal (Figura 3.12), aumentando la amplitud  $A_1$  a 100 y se analiza que pasa en el espectro de Amplitudes de Fourier (Figura 3.13).



**Figura 3.12. Generación del armónico cosenoidal en el programa de cómputo “Dinámica Estructural” (Botero, 2010)**



**Figura 3.13. Espectro de Amplitudes de Fourier para el armónico cosenoidal generado**

En la figura anterior (Figura 3.13), se evidencia que ante un aumento en la amplitud del armónico, el espectro de Fourier reporta un pico más alto, es decir una amplitud mucho mayor. Esto permite concluir que la amplitud del espectro de Fourier depende en gran parte de la amplitud de la señal de entrada.

Se realizaron varios ejercicios relacionados con el espectro de Fourier para diferentes condiciones de amplitudes, períodos, delta de tiempo y duración, generando armónicos de tipo sinusoidal y cosenoidal. Al realizar estos ejercicios

se encontró que la amplitud del espectro de Fourier para los armónicos generados se podía aproximar a:

$$A_f = \frac{A_s \times d}{2} \quad (3.2)$$

Donde,

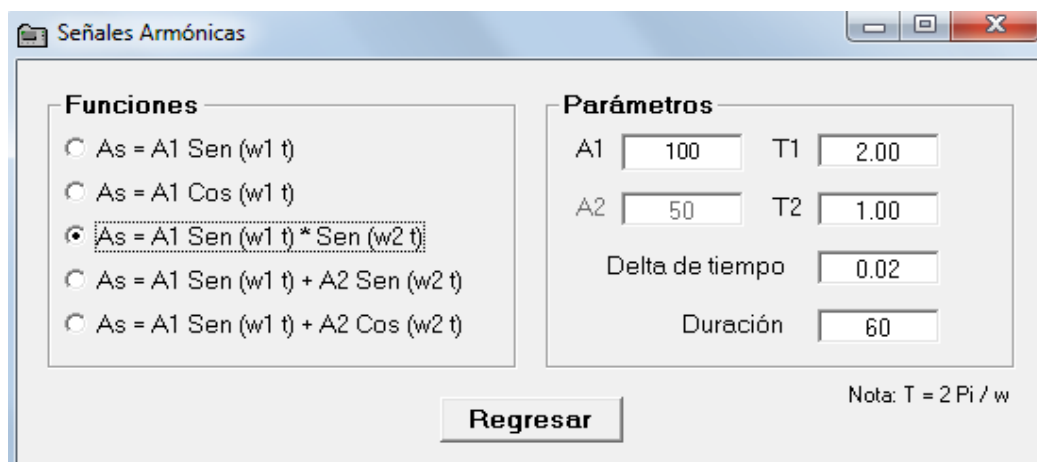
$A_f$ : Amplitud del espectro de Fourier

$A_s$ : Amplitud de la señal armónica

$d$ : Duración de la señal

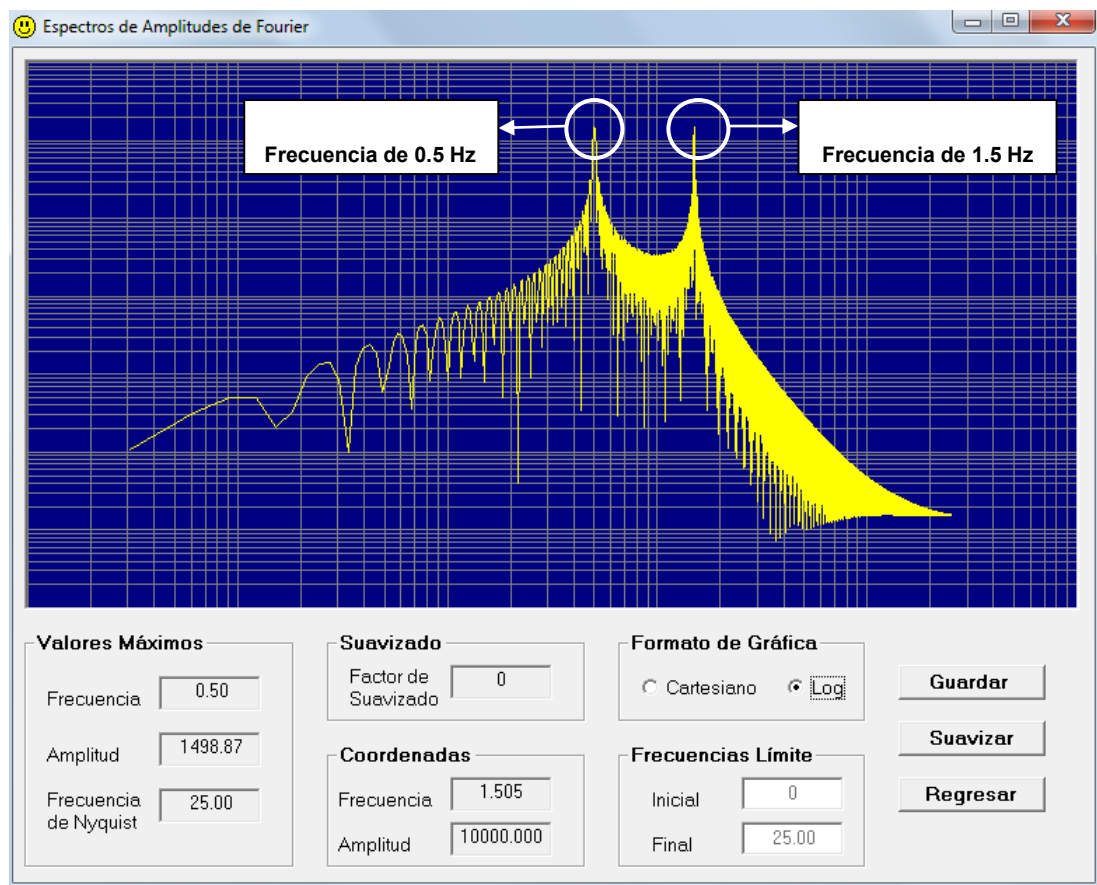
### 3.2.1.3 EJEMPLO 3

Un análisis similar al anterior, que permita encontrar relaciones importantes, se lleva a cabo, pero esta vez se emplean señales generadas a partir de multiplicaciones de armónicos o sumas de los mismos. Por ejemplo a continuación se genera un armónico producto de la multiplicación de dos funciones seno, como se puede ver en la caja de dialogo de la figura 3.14.



**Figura 3.14. Generación del armónico a partir de la multiplicación de dos funciones seno con el programa de cómputo utilizado**

El correspondiente espectro de Fourier (Figura 3.15) para el armónico generado, muestra dos frecuencias predominantes y un solo valor de amplitud representativo, lo que es coherente con la señal de entrada ya que allí también solo se tiene una amplitud.



**Figura 3.15. Espectro de Amplitudes de Fourier para la señal generada a partir de la multiplicación de armónicos tipo seno**

En esta ocasión se puede observar que la amplitud que se halla con la ecuación 3.2 para un solo armónico, se divide en dos partes iguales debido a la presencia de los dos armónicos tipo seno que se tiene en la señal.

Una vez más, se realizaron diversos ejercicios variando diferentes parámetros para generar la señal, después de realizar los posteriores análisis de los espectros de Fourier calculados, se encontró una importante relación que permite hallar las frecuencias del espectro de Fourier a partir de las frecuencias características del armónico.

Para la función generada en la figura 3.14, se tienen dos períodos,  $T_1= 2s$  y  $T_2= 1s$ , los cuales representan frecuencias de  $f_1= 0.5$  Hz y  $f_2= 1$ Hz. En el espectro de Fourier (Figura 3.15) aparecen dos frecuencias las cuales tiene relación con las frecuencias presentes en el armónico generado.

Las relaciones encontradas quedan establecidas en las ecuaciones 3.3 y 3.4.

$$f_{1f} = |f_2 - f_1| \quad (3.3)$$

$$f_{2f} = f_2 + f_1 \quad (3.4)$$

Donde,

$f_1$ : Frecuencia correspondiente a  $T_1$  en el armónico generado

$f_2$ : Frecuencia correspondiente a  $T_2$  en el armónico generado

$f_{1f}$ : Frecuencia menor característica del espectro de Fourier

$f_{2f}$ : Frecuencia mayor característica del espectro de Fourier



Es importante notar que las relaciones encontradas (ecuaciones 3.3 y 3.4) aplican para el armónico generado a partir de la multiplicación de dos funciones tipo seno, como el que se muestra en la figura 3.14.

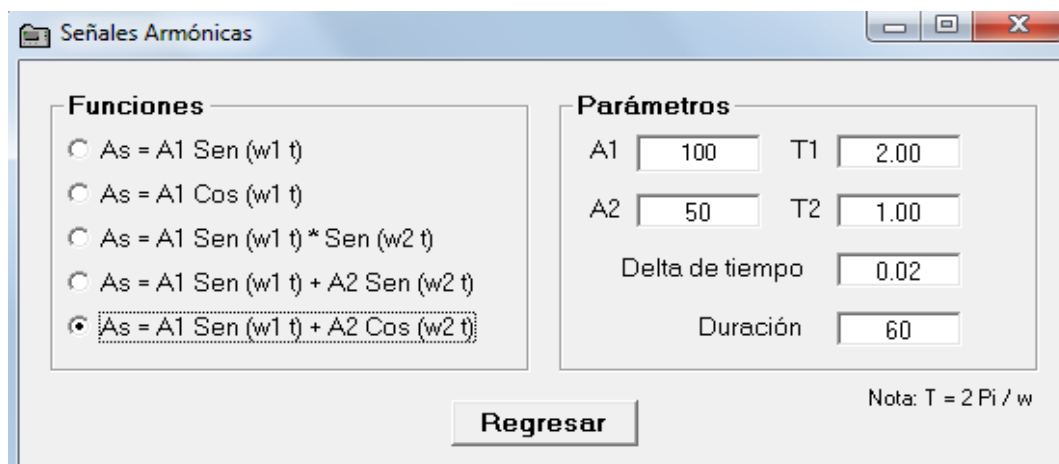
#### 3.2.1.4 EJEMPLO 4

Ahora bien, si en vez de generar un armónico a partir de la multiplicación de funciones, se hace a partir de la suma de las mismas, el resultado que se encontró en el espectro de Fourier es que las frecuencias presentes en la señal se evidencian de igual manera en el espectro de amplitudes de Fourier, es decir, si se compara con el análisis inmediatamente anterior las frecuencias que resultan para el presente caso de estudio son:

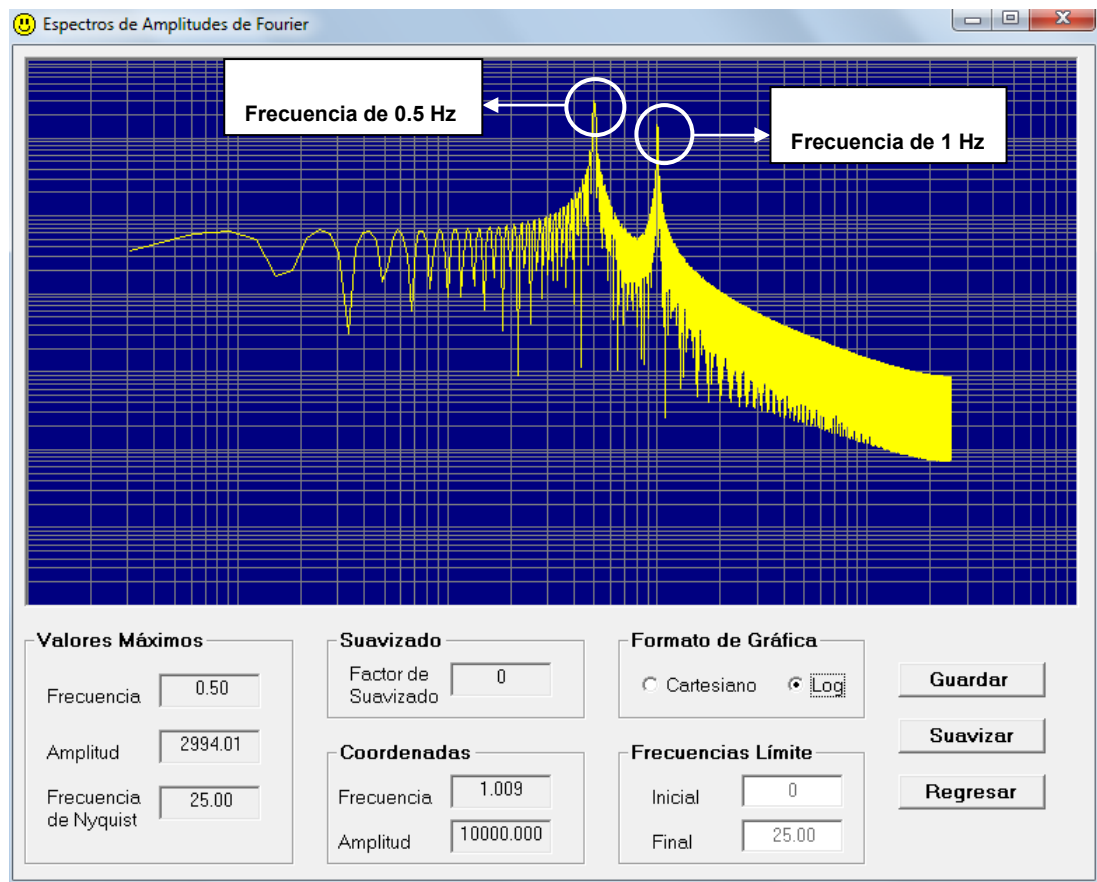
$$f_{1f} = f_1 \quad (3.5)$$

$$f_{2f} = f_2 \quad (3.6)$$

Las figuras 3.16 y 3.17 muestran respectivamente la señal que se generó y el espectro de Fourier encontrado.



**Figura 3.16. Armónico generado a partir de la suma de dos funciones**



**Figura 3.17. Espectro de Amplitudes de Fourier para la señal generada a partir de la suma de dos armónicos**

Con respecto a la amplitud del espectro de Fourier, se puede afirmar que la ecuación 3.2 se cumple perfectamente. Solo basta con aplicar la relación a cada uno de los armónicos teniendo en cuenta su respectiva amplitud en la generación de la señal y de esta forma se encuentra para su frecuencia característica su respectiva amplitud en el espectro de Fourier

Los anteriores ejercicios hicieron parte de la explicación del espectro de Fourier y de un intento por entender más a fondo la naturaleza de esta valiosa herramienta matemática y su uso en el análisis de señales.

## **4. METODOLOGÍA DEL PROYECTO**

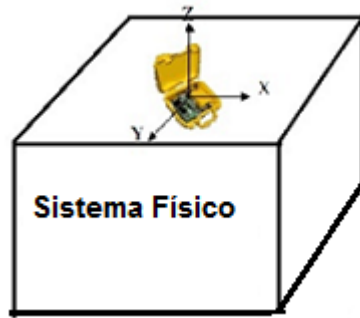
Los capítulos siguientes están destinados a la aplicación práctica de las pruebas de vibración ambiental como técnica para determinar las propiedades dinámicas de sistemas físicos.

En primera instancia se realizan pruebas de vibración forzada en la mesa vibratoria de la Universidad EAFIT que permitan validar resultados, aprender sobre el manejo del equipo y la interpretación de señales. Luego se llevan a cabo las pruebas de vibración ambiental en un edificio de concreto reforzado.

El uso de pruebas de vibración ambiental al ser pruebas programadas y que no interfieren con las actividades normales que se realizan día a día en los inmuebles, se manifiesta como un método sencillo, rápido y económico que permite realizar una gran cantidad de medidas en muy poco tiempo.

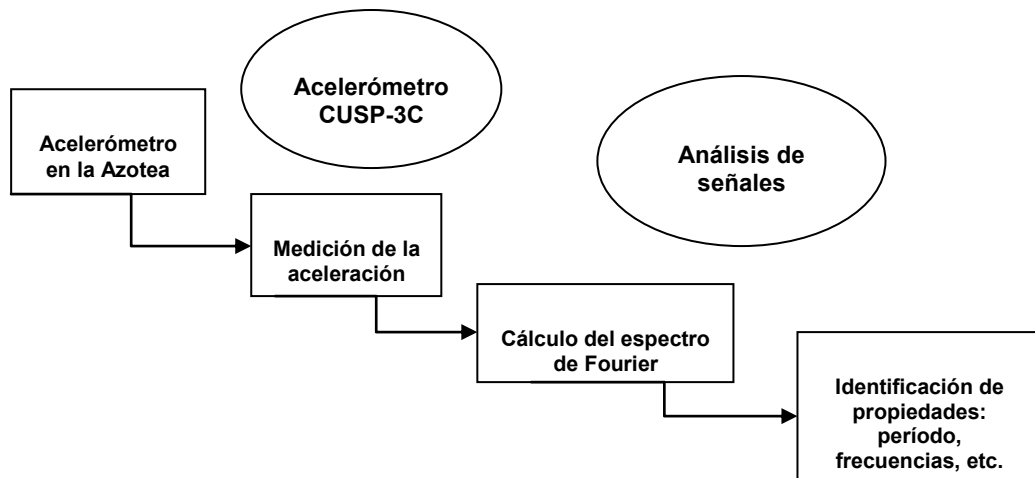
### **4.1 MÉTODO PROPUESTO**

Se aprovecha la vibración ambiental como fuente de excitación de los sistemas físicos y se utiliza un equipo triaxial para medir la aceleración en el punto que se ubique el aparato (Figura 4.1). Las medidas de aceleración serán reportadas en tres direcciones (x, y, z). Las mediciones en el sistema físico que en este caso será un edificio de concreto reforzado, se realizarán con un equipo marca Canterbury Seismic Instruments modelo CUSP-3C.



**Figura 4.1. Medición de las vibraciones del sistema físico con el acelerómetro CUSP-3C**

Una vez obtenidos los registros de las mediciones, se procede a corregir las señales y a realizar el análisis respectivo. Empleando la transformada rápida de Fourier se calcula el espectro de amplitudes de Fourier trasladando las señales del dominio del tiempo a la frecuencia. Una vez en el espectro de Fourier se puede determinar periodos o frecuencias dominantes. El proceso que se plantea se puede resumir en la figura 4.2.



**Figura 4.2. Proceso realizado con pruebas de vibración ambiental para determinar propiedades dinámicas**

## 4.2 EQUIPO UTILIZADO EN LA MEDICIÓN

Las mediciones en el modelo experimental en la mesa vibratoria y en el edificio de concreto reforzado, se realizarán con un equipo CUSP-3C (Figura 4.3), de fabricación neozelandesa.

Este equipo presenta una precisión de  $\pm 0.1\text{gals}$  ( $1\text{gals} = 1\text{cm/s}^2$ ), lo que es equivalente a 0.01 por ciento valor de la gravedad. La banda de operación en frecuencia está definida entre 0 y 100 Hz y tiene capacidad para registrar eventos con aceleraciones inferiores a tres veces la gravedad ( $\pm 3\text{g}$ ) (Botero, 2011).



**Figura 4.3. Acelerómetro CUSP-3C**

Este equipo se compone de un registrador y un digitalizador de señales, todo contenido en una caja y además cuenta con una memoria circular que almacena los datos.

El CUSP-3C utiliza sensores triaxiales MEMS (Piezo o capacitivos) con un sistema de calibración avanzada y procesamiento de señales de rutina para asegurar la fidelidad de los datos.

### **4.3 PRUEBA DE VIBRACIÓN FORZADA EN MESA VIBRATORIA**

Se planteó una medición de vibraciones en la mesa sísmica de la Universidad EAFIT, con el fin de validar resultados, calibrar el equipo que sería utilizado en las mediciones y de realizar un análisis de las señales obtenidas. Las pruebas realizadas en la mesa fueron de vibración forzada, ya que la mesa es excitada mediante el empleo de un motor y un gato hidráulico.

Estas mediciones permitieron además adquirir confiabilidad en el equipo, ya que una vez recolectado los datos, se pudo corroborar la frecuencia de la mesa, la cual según cálculos previos era conocida. Tal como se esperaba, la frecuencia de la mesa se evidenció en los espectros de amplitudes de Fourier, los cuales se calcularon a partir de los registros obtenidos en la prueba de vibración forzada.

### **4.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS AMBIENTALES EN UN EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO**

Esta constituye la parte final de este trabajo y el fin último del mismo. Es aquí donde utilizó las vibraciones ambientales para obtener registros de aceleración en un caso real.

Para llevar a cabo esta tarea, se realizaron mediciones de vibración ambiental en un sistema físico a escala real. Se tomó como sistema físico de estudio, una edificación del campus universitario de la Universidad EAFIT, más específicamente el edificio del bloque 18.

Se solicitaron los permisos requeridos y sin necesidad de interferir en las labores cotidianas en el edificio, se realizaron dos pruebas de vibración ambiental utilizando el acelerómetro CUSP-3C. Una vez capturados los registros se procedió con el posterior análisis de las señales y la identificación de los períodos propios de la estructura.

## **5. MODELO EN MESA VIBRATORIA**

Para tomar confiabilidad en el equipo utilizado en la medición, se realizaron ensayos de vibración en la mesa vibradora de la Universidad EAFIT, en Medellín, Colombia. De esta forma se pudo adquirir registros de aceleración para realizarles un posterior análisis.

### **5.1 DESCRIPCIÓN DE LA MESA**

La mesa vibradora (Figura 5.1) presenta las siguientes características (Jaramillo et al., 2008):

La mesa es cuadrada (6.0 m x 6.0 m) y tiene capacidad para soportar cargas verticales de 700 KN (70 t), desplazamientos máximos de 250 mm, cargas horizontales máximas de 200 KN (20 t) y velocidades máximas de 800 mm/s.

La plataforma de carga y fijación de especímenes es un entramado de vigas de acero de 0.36 m de altura, reforzada con diagonales en tubería de acero de 0.15 m de diámetro y además está cubierta por una lámina de acero de 3/16". Todo lo anterior hace a la plataforma una estructura prácticamente indeformable.

Para evitar la fricción, la mesa está suspendida de 8 juegos de cables de preesfuerzo de 1/2", ubicados cuatro a cada lado de la mesa. Cuando la plataforma



se desplaza horizontalmente, su máximo recorrido de 0.25 m, se levanta 9 mm por el efecto de péndulo que se genera.



**Figura 5.1. Mesa Vibradora del laboratorio de sismica de la Universidad EAFIT**

## **5.2 ENSAYOS REALIZADOS**

### **5.2.1 ENSAYO No 1**

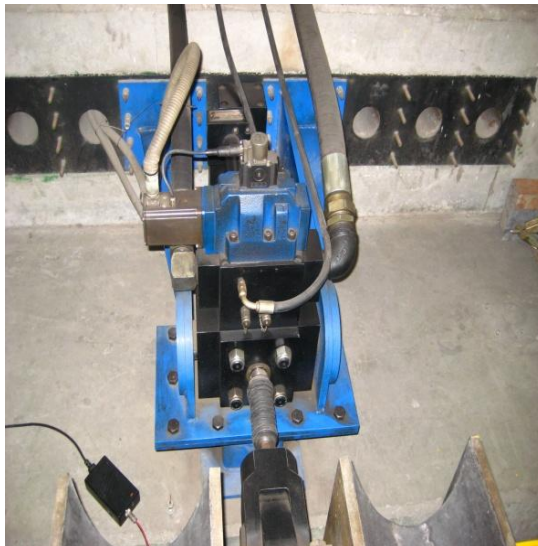
El ensayo inicial consistió en hacer vibrar la mesa con un desplazamiento lateral del gato de 0.8cm. Este desplazamiento fue inducido por medio de un motor de alta potencia (Figura 5.2) y de un gato hidráulico (Figura 5.3), el cual oscilaba con una frecuencia de 2.15 Hz.

El peso de la plataforma es de 4.2 t y a esto se le suma un peso aproximado de 0.6 t de personas que se encontraban realizando actividades de carácter lúdico y las cuales aprovecharon la situación para aprender sobre un fenómeno natural

como lo son los sismos. Además de lo anterior, hay una serie de resortes laterales, los cuales poseen una rigidez de 0.4 t/cm.



**Figura 5.2. Motor Diesel de la mesa vibradora**



**Figura 5.3. Gato Hidráulico que proporciona el desplazamiento a la mesa vibradora**

El CUSP-3C fue ubicado cerca de uno de los extremos laterales de la mesa (cerca al gato), en la zona central.

Una vez establecidas las condiciones de operación de la mesa y del acelerómetro, se procedió a realizar la prueba, la cual tuvo como duración 40 segundos. Se tomaron 200 muestras por segundo, lo que equivale decir que los registros presentan un diferencial de tiempo de 0.005 segundos. Se tomaron dos registros horizontales y uno vertical, con los cuales se pudo determinar la frecuencia asociada a cada dirección.

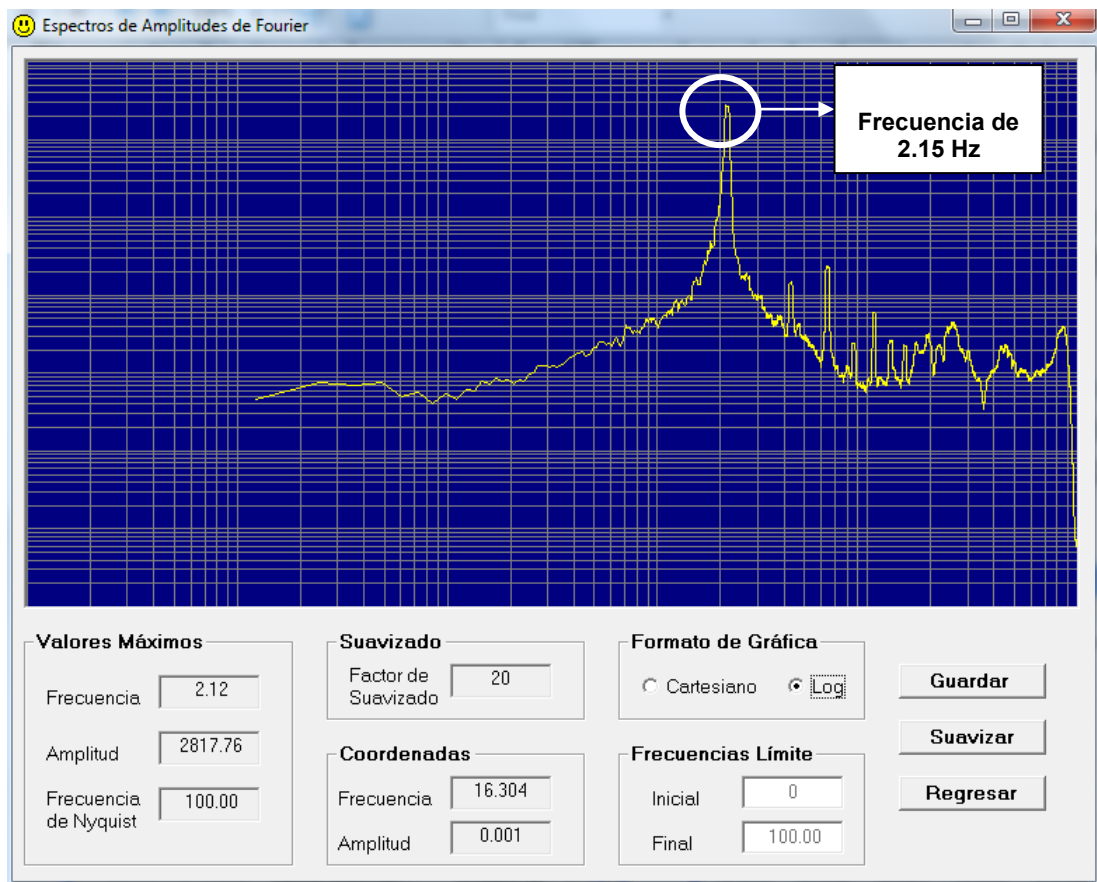
Una vez realizada la prueba se procedió al análisis de las señales obtenidas.

#### **5.2.1.1 RESULTADOS**

El registro que se tomó para realizar el análisis principal fue en dirección X (definida por la ubicación de los ejes de medida del acelerómetro), la cual es la dirección del movimiento de la mesa.

Una vez leído el registro en X y realizadas correcciones necesarias, se procedió al cálculo del espectro de amplitudes de Fourier, el cual se muestra en la figura 5.4

Aunque la señal que mas interesaba era la que se tenía en dirección X, se realizó un análisis similar en las otras dos direcciones (Y, Z) con el fin de hallar cuales eran las frecuencias más características en estos dos ejes de medida.

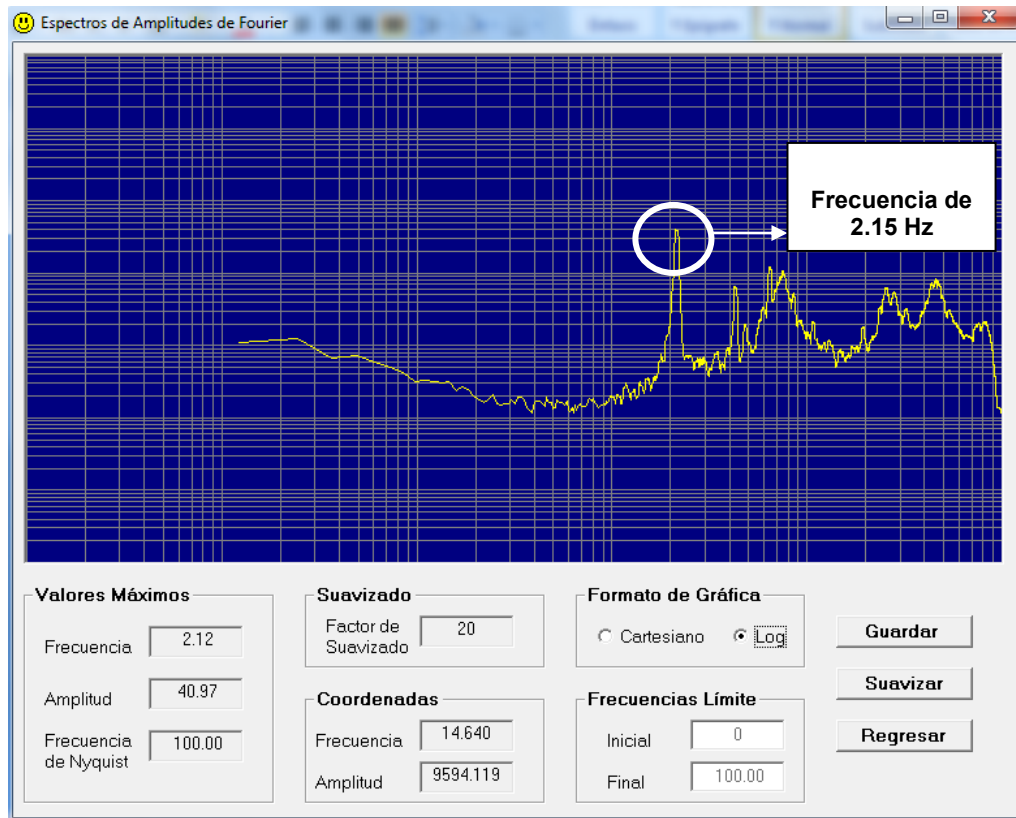


**Figura 5.4. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección X (Prueba No 1)**

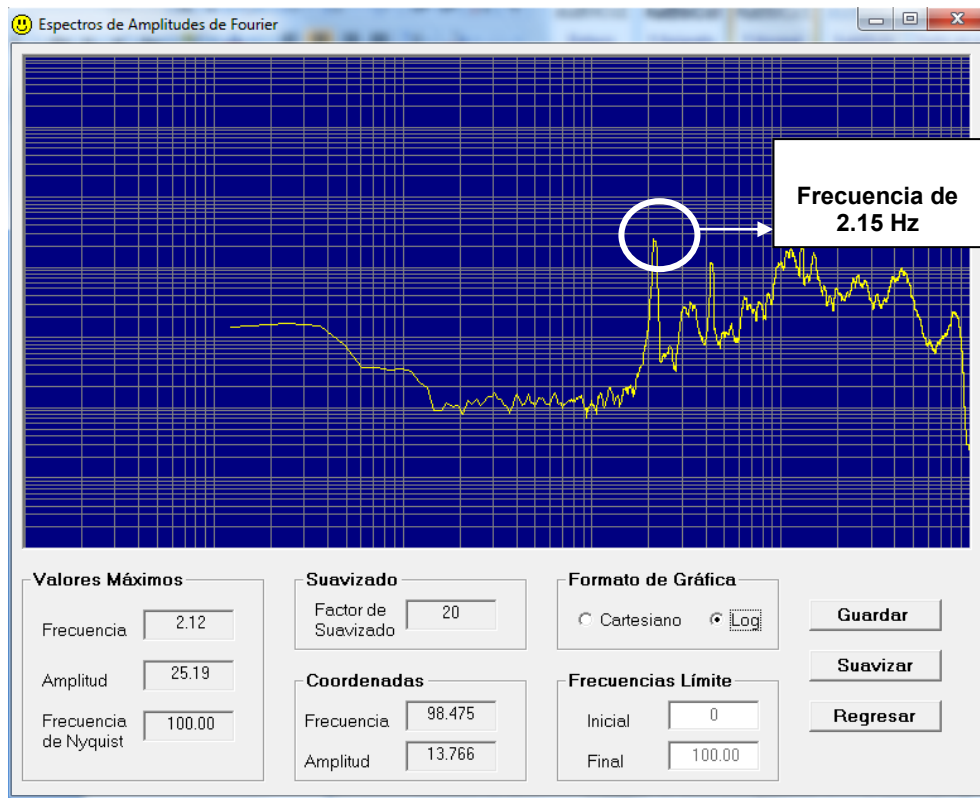
En la figura 5.4 se puede ver que la frecuencia dominante de la señal es de 2.15 Hz. Esta corresponde a la frecuencia de excitación, es decir al gato, del cual inicialmente se había dicho que este valor era conocido y que para este ensayo era de 2.15 Hz. Como se puede notar, la frecuencia es capturada por el aparato CUSP-3C y esto evidencia la confiabilidad de medición que se puede tener en el equipo.

La frecuencia de la plataforma de la mesa no se ve tan evidente en el espectro, ya que ésta según cálculos previos posee una frecuencia de 2.04 Hz, cercana a la frecuencia del gato, es decir, el sistema estaba cerca de la resonancia y por tal motivo no se ve tan marcada la diferencia entre las dos frecuencias (gato hidráulico- mesa).

Para las otras dos direcciones, Y y Z, los espectros hallados se muestran en las figuras 5.5 y 5.6 respectivamente.



**Figura 5.5. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección Y (Prueba No 1)**



**Figura 5.6. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección Z (Prueba No 1)**

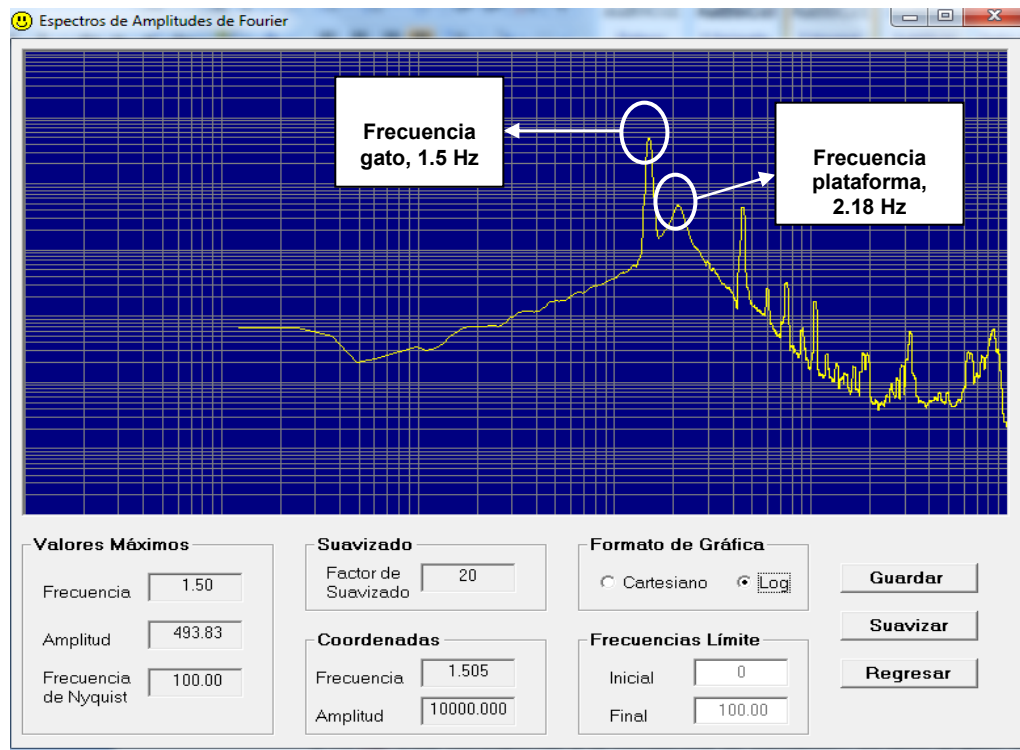
Aunque los espectros de amplitudes de Fourier encontrados para las direcciones Y y Z no son exactamente los mismos que el encontrado para la dirección X, si muestran una característica que es similar y evidente. Se puede observar una frecuencia que es la que genera el pico de mayor amplitud, esta frecuencia es sin duda alguna la de excitación y corresponde a la del gato. Al observar en la figura se corrobora que efectivamente esta es de 2.15 Hz.

Se puede afirmar que sin importar la dirección de análisis, en la prueba de vibración forzada la frecuencia de excitación aparece en los tres espectros de Fourier de cada uno de las direcciones de estudio

## 5.2.2 ENSAYO No 2

Se realizó un segundo ensayo en la mesa, pero esta vez solo se consideró el peso de la plataforma y la frecuencia del gato fue de 1.5 Hz. La frecuencia esperada para la plataforma según cálculos previos era de 2.18 Hz. Se procedió nuevamente a realizar la prueba para obtener los registros, pero esta vez se analizó solo la dirección X para la cual se halló el espectro de Fourier (Figura 5.7).

### 5.2.2.1 RESULTADOS



**Figura 5.7. Espectro de Amplitudes de Fourier para el registro obtenido sobre la mesa vibradora en dirección X (Prueba No 2)**

En la figura 5.7, se alcanza a ver claramente que las dos frecuencias esperadas son evidentes. Aparece una frecuencia predominante de 1.5 Hz, la cual genera un importante pico en el gráfico y es la de mayor amplitud, esta corresponde a la del

gato. La otra corresponde necesariamente a la frecuencia de la plataforma, la cual es de 2.18 Hz. Esta última frecuencia corresponde a un período de 0.46 s, el cual es propiamente de la plataforma.

Una vez más queda corroborado la precisión del equipo empleado para medir las aceleraciones producidas por las vibraciones de la mesa.

Comprobada la confiabilidad del equipo, en el capítulo siguiente se procederá a realizar la medición con pruebas de vibración ambiental.



## 6. PRUEBAS DE VIBRACION AMBIENTAL EN UN EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO

### 6.1 DESCRIPCION GENERAL DEL EDIFICIO

El bloque 18 es un edificio de 8 pisos en concreto reforzado, ubicado en el costado sur de la Universidad EAFIT (Figura 6.1), Medellín, Colombia.

Este edificio es de carácter administrativo y en él están ubicadas dependencias como la Rectoría, el centro de informática, el departamento de prácticas profesionales, entre otros.

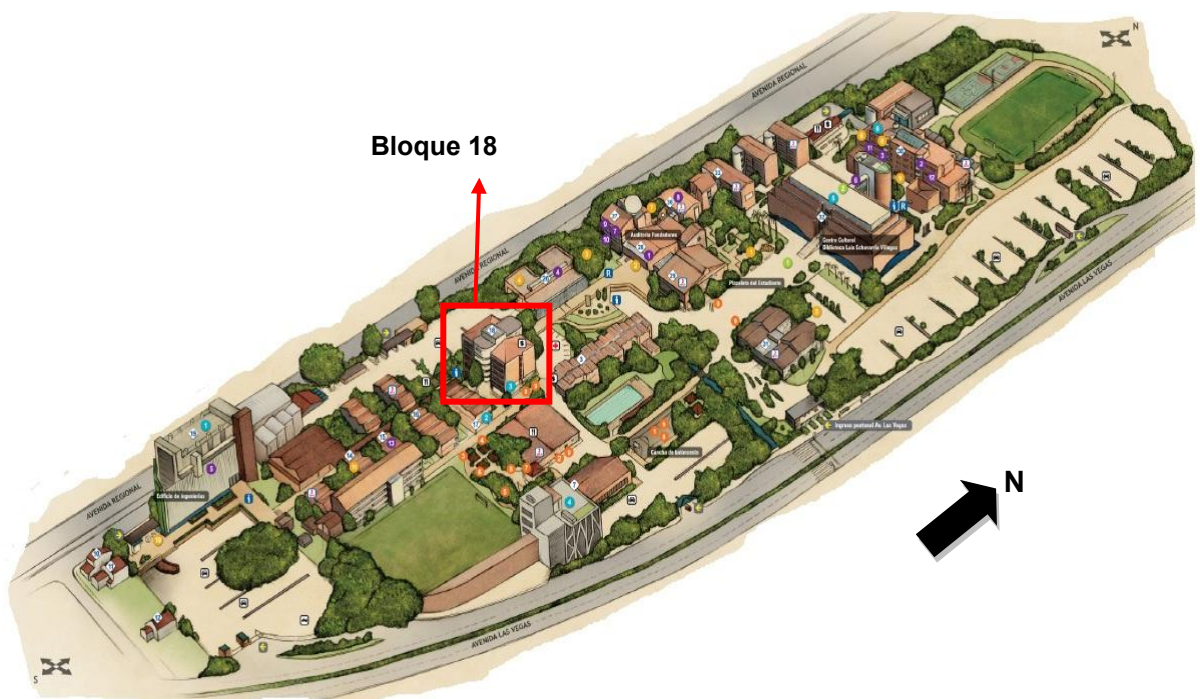


Figura 6.1. Localización del bloque 18 dentro del campus universitario

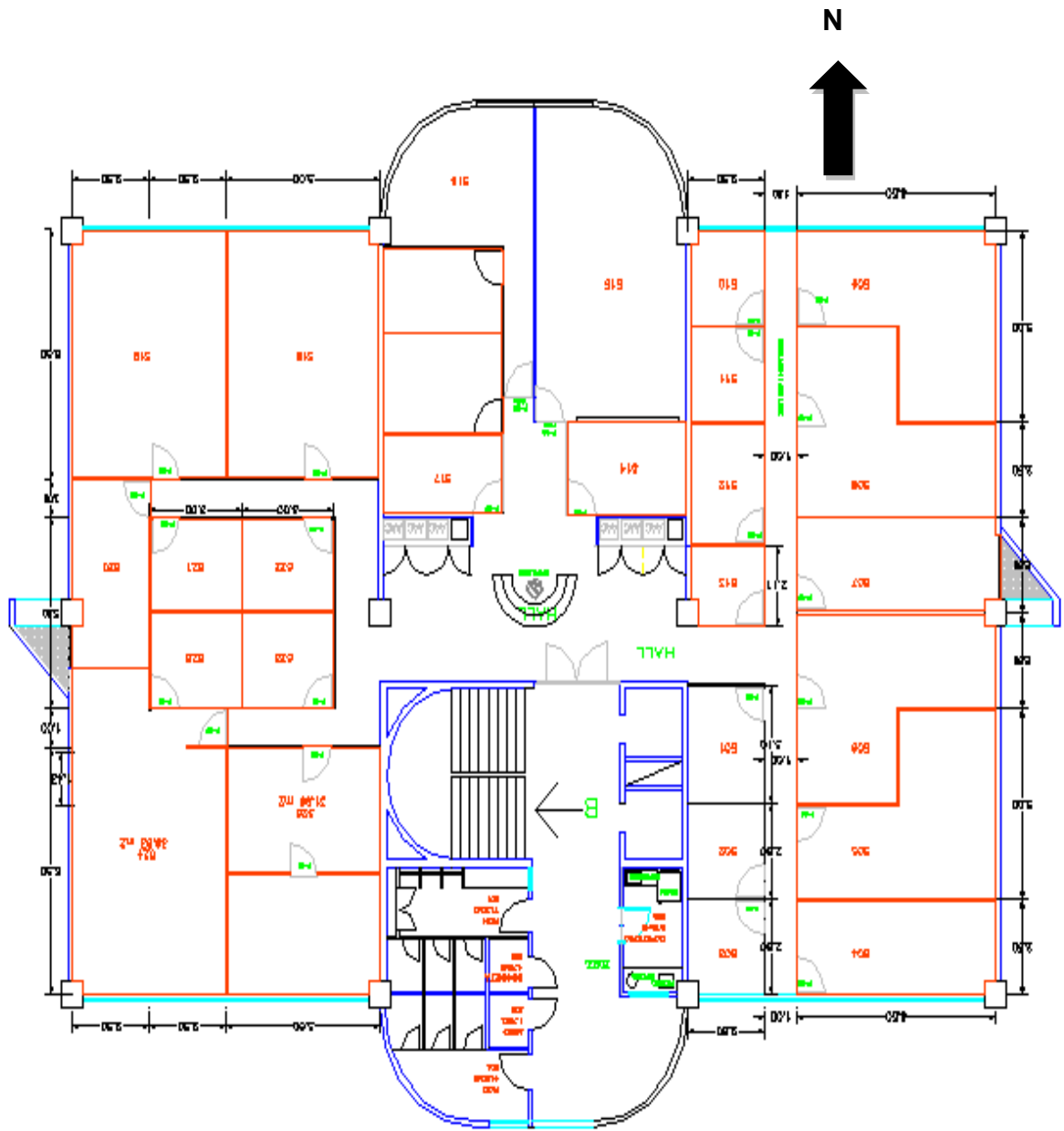
El edificio consta de 8 pisos y una pequeña terraza, la cual está a una altura de 15.26 m. Su altura de nivel de piso acabado a piso acabado es de 3.2 m. La figura 6.2 muestra la fachada del costado norte del edificio.



**Figura 6.2. Vista frontal (costado norte) del bloque 18**

Estructuralmente, se puede decir que el edificio consta de tres ejes de columnas en cada una de sus direcciones principales (longitudinal y transversal), con luces de 10 m entre ejes de columna. Estos elementos son de sección cuadrada, con dimensiones de 0.7 x 0.7 m. Además de las columnas, también hacen parte del sistema estructural dos muros pantalla, uno en la zona de las escaleras y otro en el foso del ascensor. Estos muros poseen un espesor de 0.2m.

La figura 6.3 muestra una planta típica y la distribución de columnas y pantallas que conforman la estructura.



**Figura 6.3. Planta típica del bloque 18**

En la siguiente figura (Figura 6.4), se muestra otra imagen de la edificación en uno de sus costados laterales.

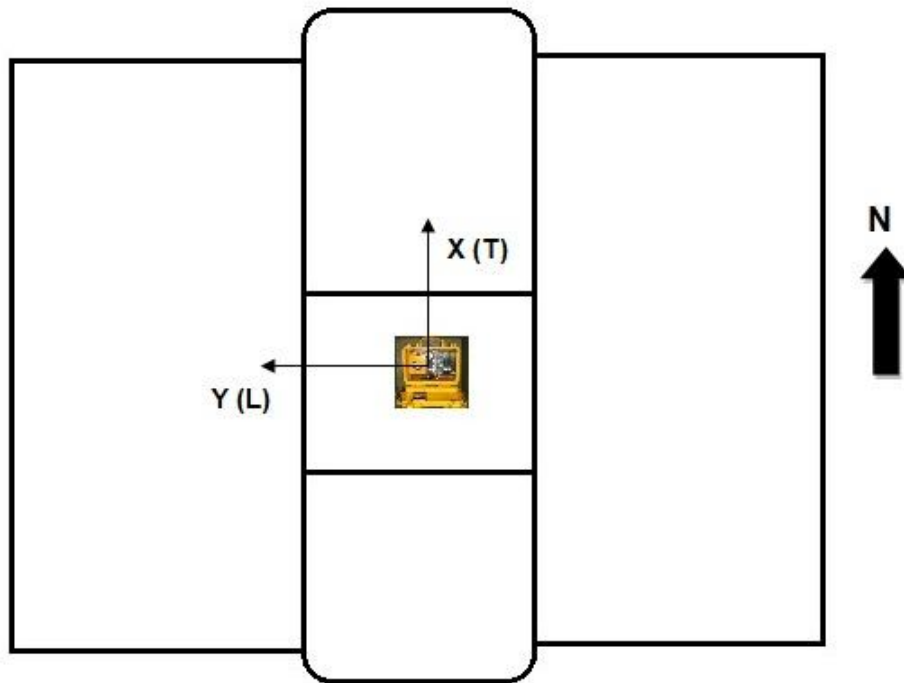


**Figura 6.4. Vista lateral (costado occidental) del bloque 18**

## **6.2 UBICACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICION**

Para realizar las pruebas de vibración ambiental, se colocó y orientó el acelerómetro CUSP-3C cerca del centro geométrico en el piso 8 de la estructura (Figura 6.5) donde se predice que hay una amplitud de las vibraciones apropiada para realizar la medición y la cual es mayor que en los pisos inferiores. Las mediciones se realizaron en las direcciones ortogonales de la edificación, las cuales se identificaron como T y L (transversal y longitudinal). La dirección T corresponde a la dirección del eje x y la dirección L es paralela al eje Y.

La figura 6.5 muestra un esquema de la ubicación del equipo en la planta general de la edificación.

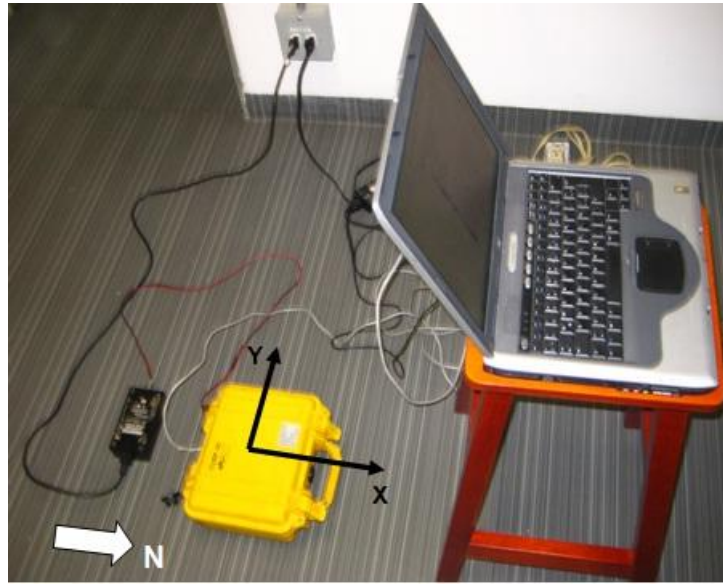


**Figura 6.5. Ubicación en planta del acelerómetro en el piso 8 del edificio**

### **6.3 PRUEBA DE VIBRACION AMBIENTAL**

En la ejecución de las pruebas de vibración ambiental, se realizó un muestreo de 200 datos por segundo, lo que equivale a decir que los registros presentan un diferencial de tiempo de 0.005 segundos. El control de inicio se hizo de forma manual y la prueba tuvo una duración de 40 segundos.

Además del acelerómetro, se utilizó una computadora portátil (Figura 6.6) con la cual fue posible generar las condiciones de medida al acelerómetro, dar la orden de inicio de la prueba y visualizar los resultados. Una vez finalizado el tiempo de medición, se transfirió los registros del acelerómetro a la computadora.



**Figura 6.6. Equipo de medición, registro y visualización de las señales**

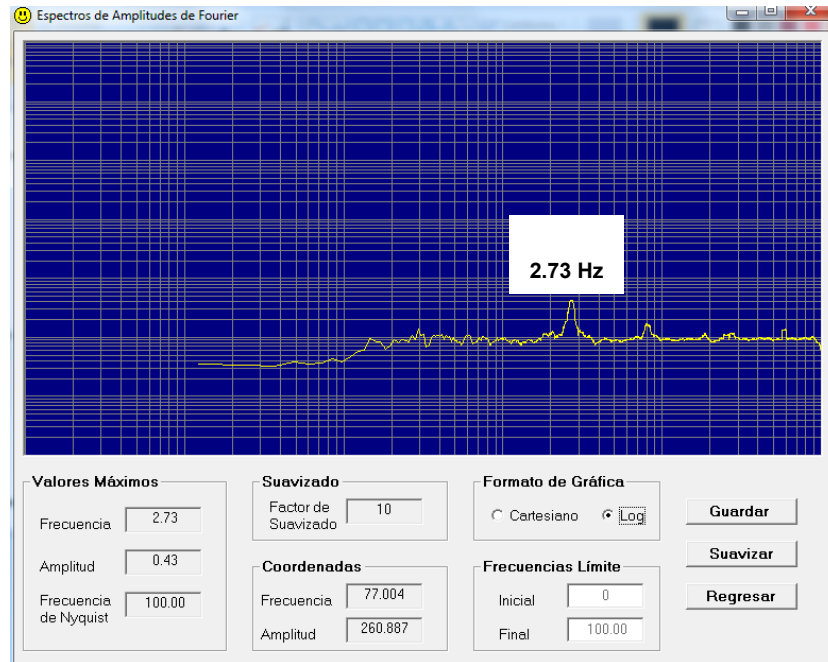
Se tomaron registros en las direcciones transversal (T) y longitudinal (L) de la estructura.

### **6.3.1 RESULTADOS**

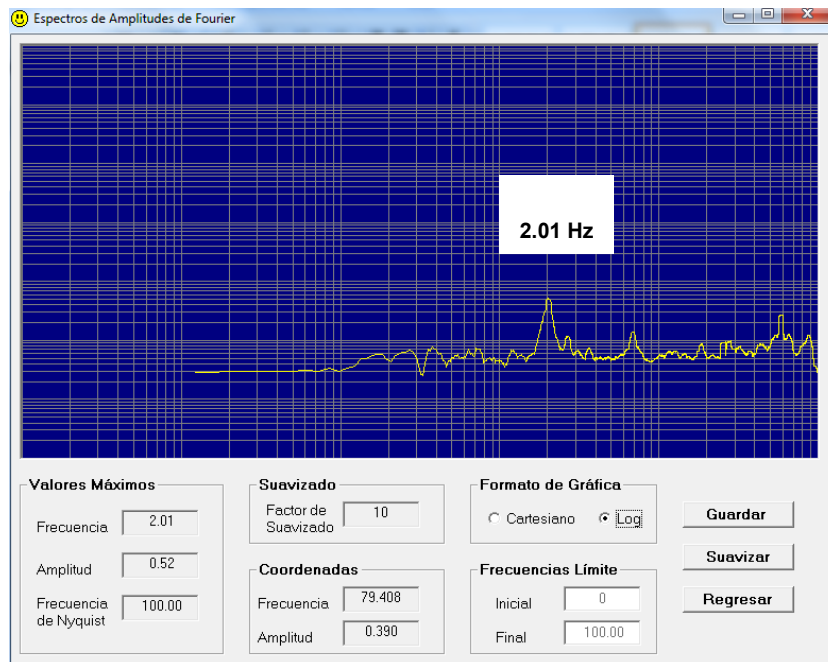
Una vez realizadas las mediciones, se realizó el posterior análisis de las señales encontradas que incluyó corrección de línea base, escalamiento, filtro pasa alta y posteriormente el cálculo del espectro de amplitudes de Fourier.

Es importante anotar que a las señales se les realizó un filtro pasa alta, cuya frecuencia mínima fue de 0.2 Hz. Este filtro se hizo con el fin de eliminar frecuencias bajas (períodos altos) que no son propios de la estructura y que por lo tanto no eran de importancia en este estudio.

Las figuras 6.7 y 6.8 muestran los espectros de amplitudes de Fourier para las direcciones transversal y longitudinal de la edificación respectivamente.



**Figura 6.7. Espectro de Amplitudes de Fourier en dirección transversal**



**Figura 6.8. Espectro de Amplitudes de Fourier en dirección longitudinal**

De la figura 6.7 se pudo observar una frecuencia dominante de 2.73 Hz que genera un pico importante y de mayor amplitud en el espectro. Esta frecuencia equivale a un período de 0.37 s, el cual se puede interpretar como el período fundamental del edificio en la dirección transversal.

De forma similar, se obtuvo para la dirección longitudinal una frecuencia predominante de 2.01 Hz, equivalente a un período de 0.48 s.

Es importante anotar, que a pesar de los valores bajos de amplitud que se observan en el espectro, es posible visualizar las frecuencias predominantes de la estructura sin mayor dificultad. Esto brinda confiabilidad del equipo y de su sensibilidad en la medición.

En la tabla 6.1 se visualiza el resumen de las frecuencias y períodos encontrados, para cada una de las direcciones de medida.

**Tabla 6.1. Resumen de frecuencias y períodos encontrados**

MODO DE VIBRACIÓN	DIRECCIÓN DE ANÁLISIS	
	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
1	2.01 Hz (0.5 s)	2.73 Hz (0.37 s)
2	6.8 Hz (0.15 s)	8.03 Hz (0.12 s)



## 6. PRUEBAS DE VIBRACION AMBIENTAL EN UN EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO

### 6.1 DESCRIPCION GENERAL DEL EDIFICIO

El bloque 18 es un edificio de 8 pisos en concreto reforzado, ubicado en el costado sur de la Universidad EAFIT (Figura 6.1), Medellín, Colombia.

Este edificio es de carácter administrativo y en él están ubicadas dependencias como la Rectoría, el centro de informática, el departamento de prácticas profesionales, entre otros.

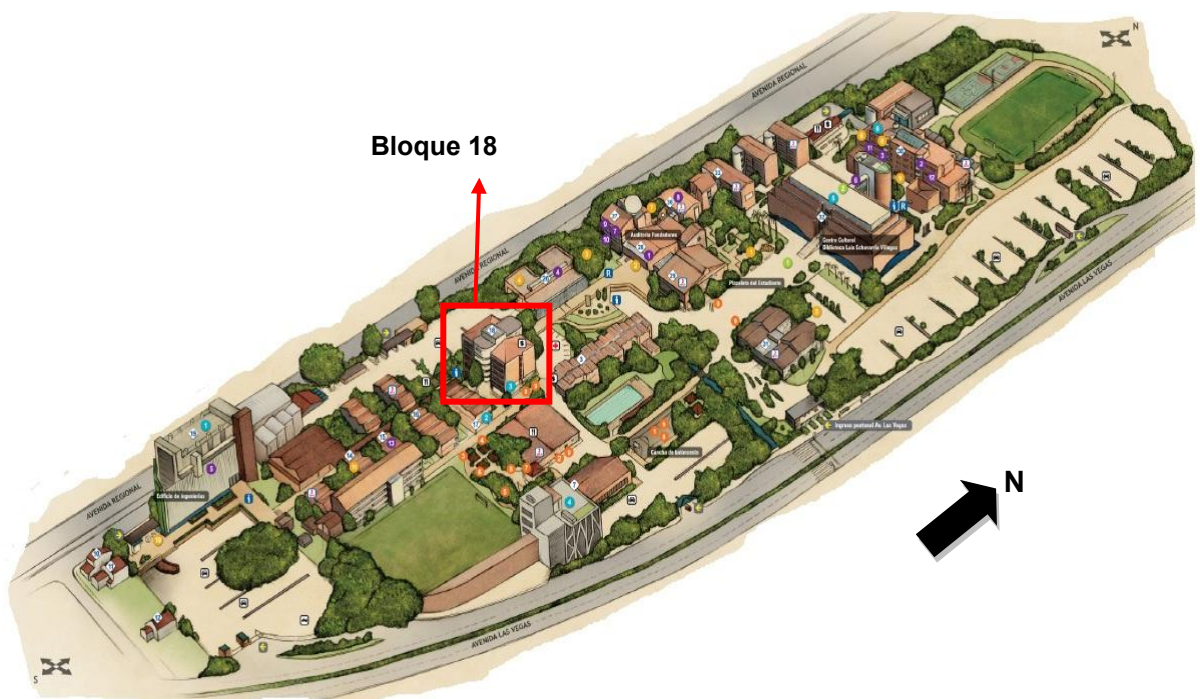


Figura 6.1. Localización del bloque 18 dentro del campus universitario

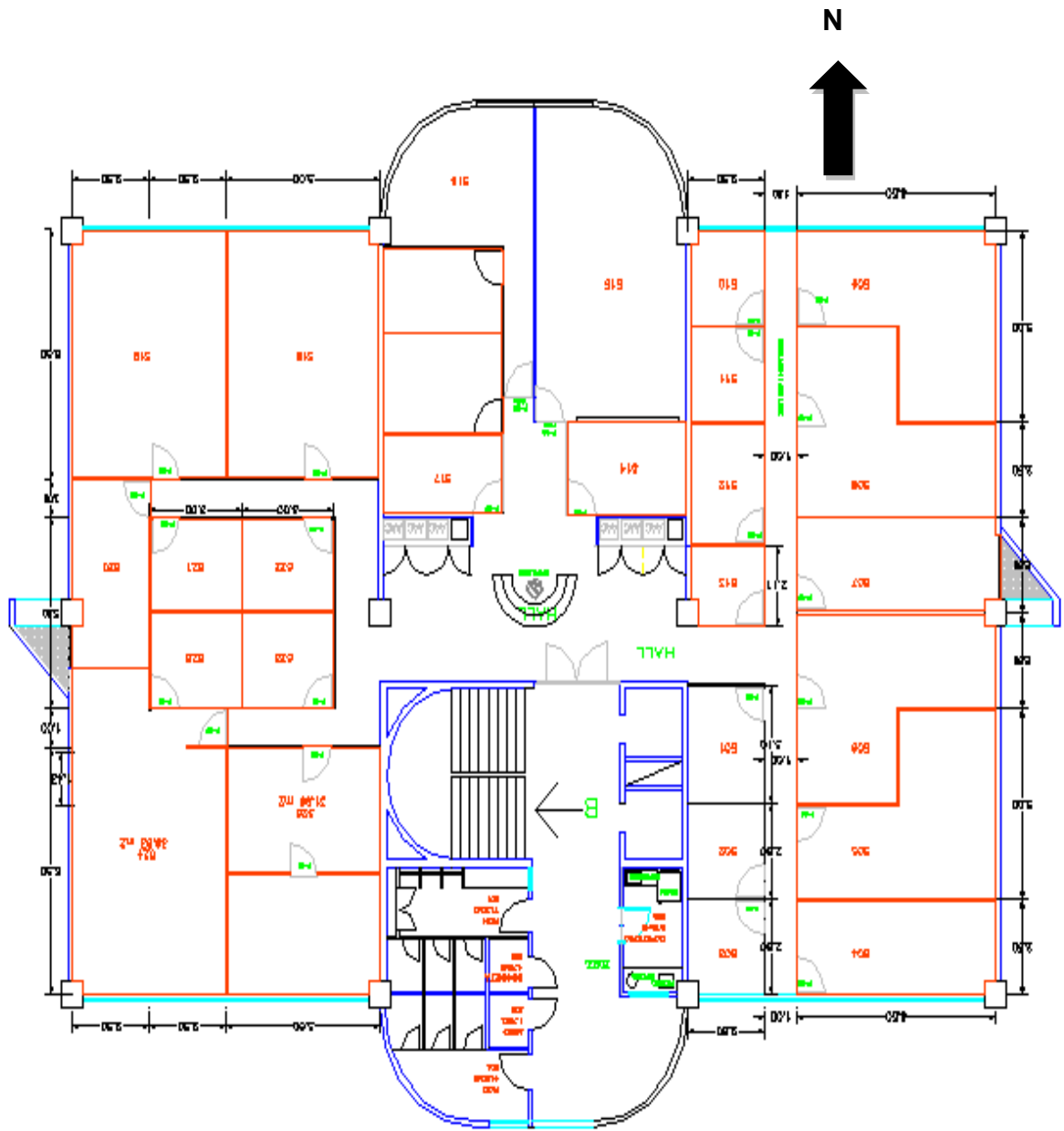
El edificio consta de 8 pisos y una pequeña terraza, la cual está a una altura de 15.26 m. Su altura de nivel de piso acabado a piso acabado es de 3.2 m. La figura 6.2 muestra la fachada del costado norte del edificio.



**Figura 6.2. Vista frontal (costado norte) del bloque 18**

Estructuralmente, se puede decir que el edificio consta de tres ejes de columnas en cada una de sus direcciones principales (longitudinal y transversal), con luces de 10 m entre ejes de columna. Estos elementos son de sección cuadrada, con dimensiones de 0.7 x 0.7 m. Además de las columnas, también hacen parte del sistema estructural dos muros pantalla, uno en la zona de las escaleras y otro en el foso del ascensor. Estos muros poseen un espesor de 0.2m.

La figura 6.3 muestra una planta típica y la distribución de columnas y pantallas que conforman la estructura.



**Figura 6.3. Planta típica del bloque 18**

En la siguiente figura (Figura 6.4), se muestra otra imagen de la edificación en uno de sus costados laterales.

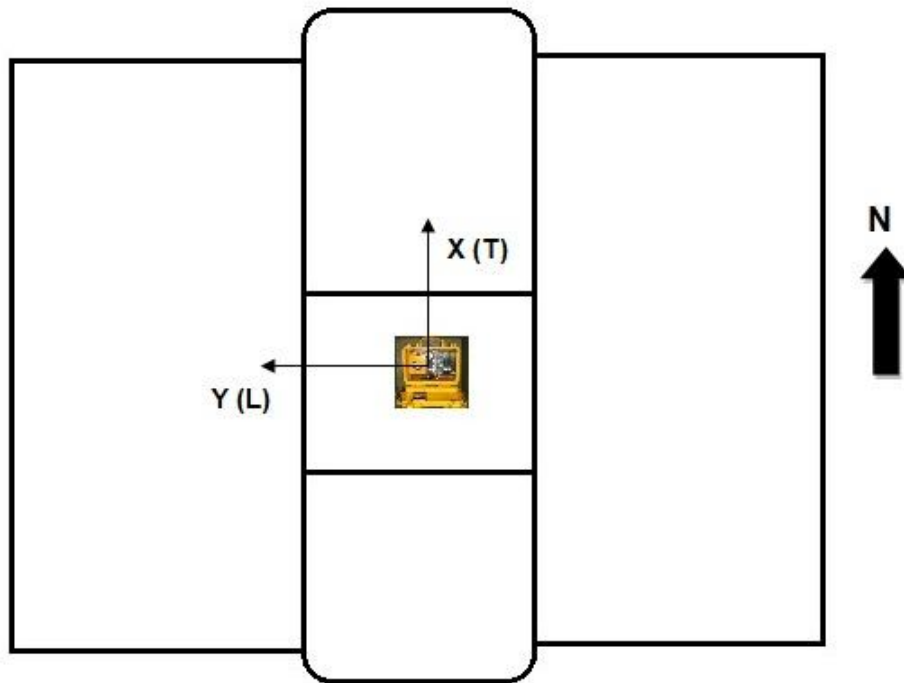


**Figura 6.4. Vista lateral (costado occidental) del bloque 18**

## **6.2 UBICACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICION**

Para realizar las pruebas de vibración ambiental, se colocó y orientó el acelerómetro CUSP-3C cerca del centro geométrico en el piso 8 de la estructura (Figura 6.5) donde se predice que hay una amplitud de las vibraciones apropiada para realizar la medición y la cual es mayor que en los pisos inferiores. Las mediciones se realizaron en las direcciones ortogonales de la edificación, las cuales se identificaron como T y L (transversal y longitudinal). La dirección T corresponde a la dirección del eje x y la dirección L es paralela al eje Y.

La figura 6.5 muestra un esquema de la ubicación del equipo en la planta general de la edificación.

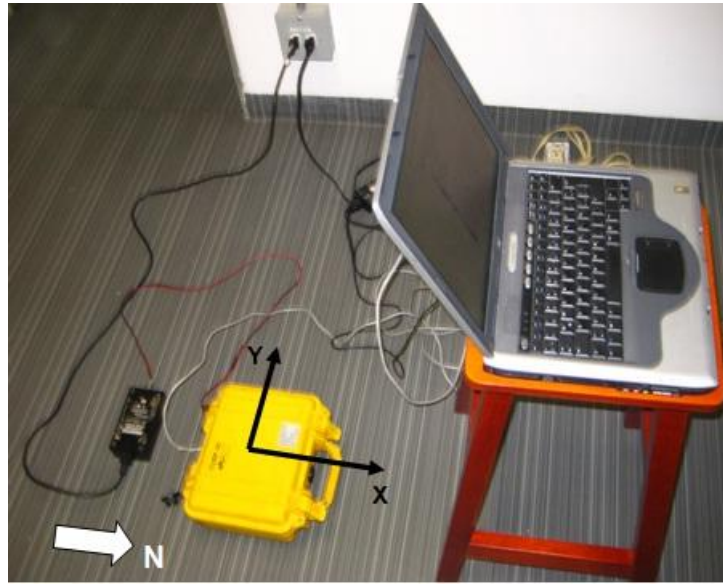


**Figura 6.5. Ubicación en planta del acelerómetro en el piso 8 del edificio**

### **6.3 PRUEBA DE VIBRACION AMBIENTAL**

En la ejecución de las pruebas de vibración ambiental, se realizó un muestreo de 200 datos por segundo, lo que equivale a decir que los registros presentan un diferencial de tiempo de 0.005 segundos. El control de inicio se hizo de forma manual y la prueba tuvo una duración de 40 segundos.

Además del acelerómetro, se utilizó una computadora portátil (Figura 6.6) con la cual fue posible generar las condiciones de medida al acelerómetro, dar la orden de inicio de la prueba y visualizar los resultados. Una vez finalizado el tiempo de medición, se transfirió los registros del acelerómetro a la computadora.



**Figura 6.6. Equipo de medición, registro y visualización de las señales**

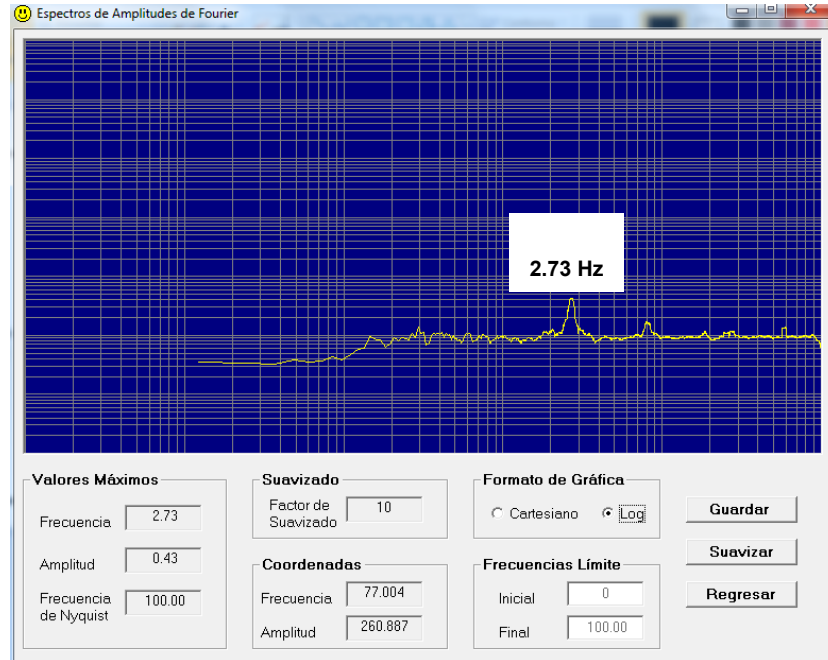
Se tomaron registros en las direcciones transversal (T) y longitudinal (L) de la estructura.

### **6.3.1 RESULTADOS**

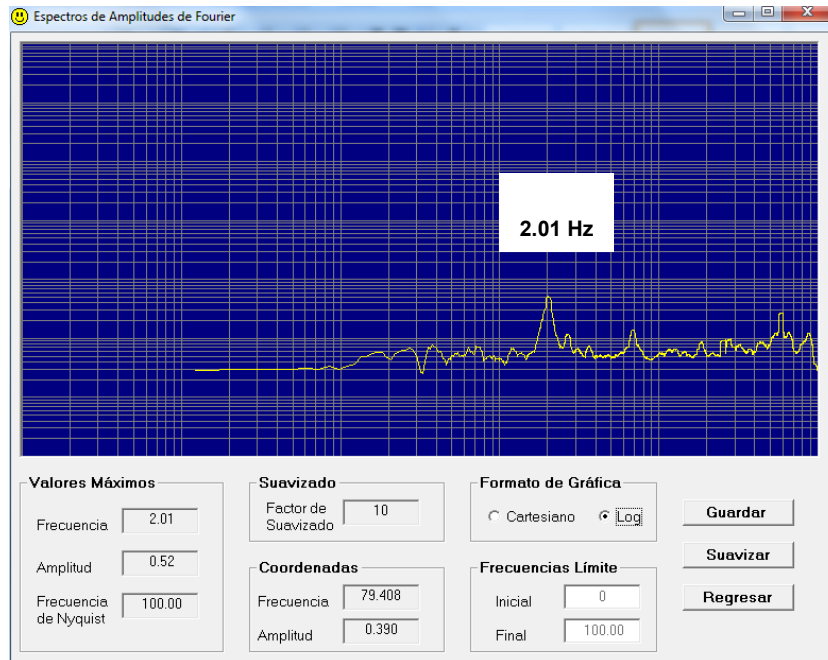
Una vez realizadas las mediciones, se realizó el posterior análisis de las señales encontradas que incluyó corrección de línea base, escalamiento, filtro pasa alta y posteriormente el cálculo del espectro de amplitudes de Fourier.

Es importante anotar que a las señales se les realizó un filtro pasa alta, cuya frecuencia mínima fue de 0.2 Hz. Este filtro se hizo con el fin de eliminar frecuencias bajas (períodos altos) que no son propios de la estructura y que por lo tanto no eran de importancia en este estudio.

Las figuras 6.7 y 6.8 muestran los espectros de amplitudes de Fourier para las direcciones transversal y longitudinal de la edificación respectivamente.



**Figura 6.7. Espectro de Amplitudes de Fourier en dirección transversal**



**Figura 6.8. Espectro de Amplitudes de Fourier en dirección longitudinal**

De la figura 6.7 se pudo observar una frecuencia dominante de 2.73 Hz que genera un pico importante y de mayor amplitud en el espectro. Esta frecuencia equivale a un período de 0.37 s, el cual se puede interpretar como el período fundamental del edificio en la dirección transversal.

De forma similar, se obtuvo para la dirección longitudinal una frecuencia predominante de 2.01 Hz, equivalente a un período de 0.48 s.

Es importante anotar, que a pesar de los valores bajos de amplitud que se observan en el espectro, es posible visualizar las frecuencias predominantes de la estructura sin mayor dificultad. Esto brinda confiabilidad del equipo y de su sensibilidad en la medición.

En la tabla 6.1 se visualiza el resumen de las frecuencias y períodos encontrados, para cada una de las direcciones de medida.

**Tabla 6.1. Resumen de frecuencias y períodos encontrados**

MODO DE VIBRACIÓN	DIRECCIÓN DE ANÁLISIS	
	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
1	2.01 Hz (0.5 s)	2.73 Hz (0.37 s)
2	6.8 Hz (0.15 s)	8.03 Hz (0.12 s)



## **8. AGRADECIMIENTOS**

El autor desea expresar su más sincero agradecimiento al Dr. Juan Carlos Botero Palacio, docente y coordinador de la especialización en ingeniería sísmo resistente de la Universidad EAFIT, por su asesoría y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

De igual forma se agradece a la Universidad EAFIT, en especial al personal del laboratorio de suelos, concretos y pavimentos por permitir utilizar el acelerómetro CUSP-3C en las mediciones.

Finalmente al señor Ricardo Tamayo, por otorgar el permiso necesario para realizar las pruebas de vibración ambiental en el bloque 18 de la Universidad EAFIT.

## 7. CONCLUSIONES

Las frecuencias y los períodos determinados mediante pruebas de vibración ambiental están asociados a amplitudes de excitación bajas, por lo tanto este método se puede considerar como una aproximación al caso real, en el cual estos parámetros dinámicos pueden aumentar a causa de sollicitaciones mayores como son los sismos.

Teniendo en cuenta que las pruebas de vibración ambiental emplean vibraciones de muy baja amplitud, se debe contar con un equipo de alta sensibilidad de forma que todas las frecuencias predominantes y sus respectivas amplitudes puedan ser capturadas en los registros.

Con respecto al caso real de estudio, se logró determinar de forma experimental las frecuencias y períodos fundamentales de un edificio de 8 pisos de concreto reforzado. Se puede afirmar con base a los períodos fundamentales obtenidos, que la edificación presenta una mayor rigidez en su dirección transversal en comparación con la dirección longitudinal.

## REFERENCIAS

**Abdel-Ghaffar, A.M. y Housner, G.W., 1977.** *An Analysis of Dynamic Characteristics of a Suspension Bridge by Ambient Vibration Measurements.* Report EERL 77-01, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A.

**Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R. y Craig, M., 1980.** *Full-Scale Experimental Investigation of a Modern Earth Dam.* Report EERL 80-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A.

**Beck, J.L., May, B.S., Polidori, D.C. y Vanik, M.W., 1995.** *Ambient Vibration Surveys of Three Steel- Frame Buildings Strongly Shaken by the 1994 Northridge Earthquake.* Report EERL 95-06, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A.

**Boroschek, R. y Astroza, M., 1998.** *Estudio de Vulnerabilidad Sísmica y Daño en la Torre Principal del Hospital de Coquimbo.* Informe Fundación para la Transferencia Tecnológica-Servicio de Salud de Coquimbo, Coquimbo, Chile.

**Boroschek, R., Moroni, M. y Sarrazin, M., 2003.** *Dynamic Characteristics of a Long Span Seismic Isolated Bridge.* Engineering Structures, vol. 25, pp. 1479-1490.

**Botero, J.C., 2011.** *Dinámica de Estructuras. Sistemas de un Grado de Libertad.* Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

**Botero, J.C., 2010.** *Dinámica Estructural.* Programa de Cómputo. En <http://dl.dropbox.com/u/1314525/Instalar304.exe>.

**Brownjohn, J.M.W., Dumanoglu, A.A. y Taylor, C.A., 1987.** *Ambient Vibration Measurements of the Humber Suspension Bridge and Comparison with Calculated Characteristics.* Proc. Institution of Civil Engineers, Part 2- Research and Theory, Vol. 83, No. 2, pp. 561-600.

**Carder, D.S., 1936.** *Observed vibration of buildings.* Bulletin Of The Seismological Society Of America, Vol. 26, pp. 245-277.

**Carreño, E., Bravo, B., Suárez, A. y Tordesillas, J.M., 1999.** *Registro y Tratamiento de Acelerogramas.* Física de la Tierra, No. 11, pp. 281-111.

**Carrillo, J., 2009.** *Estimación de los Períodos Naturales de Vibración de Viviendas de Baja Altura con Muros de Concreto.* Ciencia e Ingeniería Neograndiana, Vol. 19-1, pp. 39-54.

**Carydis, P. y Mouzakis, H.P., 1986.** *Small Amplitude Vibration measurements of Buildings Undamaged, Damaged, and Repaired after Earthquakes.* Earthquake Spectra, Vol.2, No. 3, pp. 515-535.

**Celebi, M. y Safak, E., 1992.** *Seismic Response of Pacific Park Plaza. I: data and Preliminary Analysis .* Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 6, pp. 1547-1565.

**Cooley, J.W y Turkey, J.W., 1965.** *An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series,* Math.Computation, Vol. 19, April.

**Espinoza, F., 1999.** *Determinación de Características Dinámicas de Estructuras.* Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

**Flórez, C. y Lozano, C., 2007.** *Análisis y Tratamiento de Señales de Fuentes Sismogénicas de Campo Cercano a San José de Cúcuta.* Proc. Conferencia Internacional Ingeniería Sísmica, Lima, Perú.

**García, L., 2006.** *Refabricación de Estructuras en Zonas Sísmicas- El Caso de Colombia-*. Proc. 2do Encuentro Latinoamericano y 1er Congreso Internacional de Estructuras Prefabricadas, Veracruz, México.

**Gonzalo, M. J., 2004.** *Electrónica de Potencia y Medida.* Curso Area de Tecnología Electrónica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo, Oviedo, España.

**Higashihara, H., Moriya, T. y Tajima J., 1987.** *Ambient vibration test of an anchorage of south Bisan-Seto suspension Bridge.* Earthquake engineering and structural Dynamics, Vol. 15, pp.679-695.

**Huerta, C., Lomelí, D., Esparza, M., Espinoza, F., Conteras, R. y Baltazar, Y.,2009.** *Frecuencias de Vibración teoricas y Experimentales de un Edificio de Nueve Pisos Localizado en la Vecindad de la Zona Río de Tijuana,BC,México.* Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol. 9, pp. 97-114.

**Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 2002.** *Proyecto GEORIESGOS [Online]: página web.* Managua, Nicaragua: Dirección General de Geofísica,2010.(Citada:24abril,2010)

<http://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/proyectos/georiesgos/terminos.html>

**Ivanovic, S.S., Trifunac, M.D. y Todorovska, M.I., 2000.** *Ambient Vibration Tests of Structures- A Review.* ISET Journal of Earthquake Technology, paper No. 407, Vol. 37, No. 4, pp. 165-197.

**Jaramillo, J. D., Morales, M. y Hincapie, G., 2008.** *Respuesta Sísmica de Muros de Mampostería no Reforzada Sometidos a Aceleraciones Perpendiculares a su Plano.* Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol. 8(2), pp. 183-200.

**Luz, E., Gurrer-Beyer, C. y Stoecklin, W., 1983.** *Identification of Natural Frequencies and Modes of a Nuclear Power Plant by Means of Excitation with Environment Noise.* Transactions of the 7<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. K(b), pp. 437-443.

**Marshall, R.D., Phan L.T. y Celebi, M., 1994.** *Full-Scale Measurement of Building Response to Ambient Vibration and to the Loma Prieta Earthquake.* Proc. Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Vol. 11, pp. 661-670.

**Mendoza, L., Reyes, A. y Luco, J., 1991.** *Ambient Vibration Tests of Mexicali General Hospital.* Earthquake Spectra, Vol. 7, No. 2, pp. 281-300.

**Miranda, E. y Bertero, V., 1993.** *Respuesta Sísmica de un Edificio Instrumentado de 30 Pisos Durante El Sismo de Loma Prieta.* Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.

**Muñoz, E., Nuñez, F., Rodríguez, J., Ramos, A. y Otálora, C., 2008.** *Vulnerabilidad Sísmica y Capacidad de Carga de un Puente en Acero Basado en Confiabilidad Estructural.* Revista Ingeniería de Construcción, vol. 23, No. 3, pp. 125-144.

**Muñoz, E., Nuñez, F., Rodríguez, J., Ramos, A. y Otálora, C., 2010.** *Vulnerabilidad Sísmica y Capacidad de Carga de un Puente Atirantado Basados en Confiabilidad Estructural.* Revista Ingeniería de Construcción, vol. 25, No. 2, pp. 285-323.

**Muria-Vila, D. y Moreno, R. de C., 1993.** *Identificación de las Propiedades Dinámicas Mediante Vibración Ambiental. El Edificio de Jalapa.* Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.

**Muria-Vila, D. y González, R., 1995.** *Propiedades Dinámicas de Edificios de la Ciudad de México.* Revista de Ingeniería Sísmica, No. 51, pp.25-45, México.

**Muria-Vila, D. y Sánchez, A.R., 2005.** *Pruebas Experimentales en el Distribuidor Vial de San Antonio.* Revista Construcción y Tecnología, pp. 30-43.

**Nigbor, R., Cakmak, A. y Mark, R., 1992.** *Measured to the Max.* Civil Engineering, No.11, pp. 44-47.

**Pernia, D., 2004.** *Introducción a la medición de la vibración.* Postgrado en Automatización e Instrumentación, Universidad de los Andes, Mérida- Av. Tulio Febres Cordero-, Venezuela.

**Ren, W., Zatar, W. y Harik, I., 2004.** *Ambient Vibration-Based Seismic Evaluation of a Continuous Girder Bridge.* Engineering Structures, vol. 26, pp. 631- 640.

**Roca, A.M., 1989.** *Instrumentación para Campo Cercano y Análisis de Acelerogramas.* Física de la Tierra, No. 1, pp. 131-153.

**Rojas R., Jara J.M, Hernandez, H. y Cruz, J.I., 2005.** *Estudio con Vibración Ambiental de un Puente Peatonal.* Proc. 1er Foro Académico de la DES de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.

**Trifunac, M.D., 1970a.** *Ambient Vibration Test of a 39-Story Steel Frame Building.* Report EERL 70-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A.

**Trifunac, M.D., 1970b.** *Wind and Microtemors Induced Vibrations of a 22-Story Steel Frame Building.* Report EERL 70-011, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Tecchnology, Pasadena, California, U.S.A.

**Trifunac, M.D., 1972.** *Comparison Between Ambient and Forced Vibration Experiments.* Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, pp. 133-150.

**Udwadia, F.E. y Trifunac, M.D, 1973.** *Ambient Vibration Test of Full-Scale Structure.* Proceedings 5<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy.



