



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Propiedades dinámicas de edificios  
escolares como parámetro de  
evaluación de la salud estructural  
empleando registros de vibraciones  
ambientales**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Andres Arzate Mendoza

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro



Ciudad Universitaria, Cd. México., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## DEDICATORIAS

**A mi Mamá Columba Mendoza Vázquez**, eres una de las personas más importantes en mi vida, siempre has estado ahí cuando te necesito incluyendo las varias veces que me desvele por tarea o por llegar tarde de la escuela, siempre me enseñaste valores y responsabilidades que aplico al día a día de mi vida, tu cariño, comprensión, ayuda, protección y muchas cosas más son parte del soporte de mi vida te quiero, besos y gracias por todo.

**A mi Papá Héctor Pedro Arzate Estrada**, al igual que mi mamá eres y serás siempre una de las personas más importantes en mi vida, eres un ejemplo de persona desde tu forma de ser, tu sencillez y tenacidad ante la vida, me has demostrado que el tener una vida es más importante que tener todo el estudio posible ya que las experiencias son el fundamento de lo que somos, te agradezco por todo el apoyo que me has brindado, el amor, comprensión y felicidad. Estas palabras no son suficientes para describir lo que siento. Besos y abrazos y un gracias por todo.

**A mis dos Padres**, palabras, quisiera decirles todo el diccionario entero, pero son insuficientes ante el amor que les tengo, además del agradecimiento eterno y felicidad de siempre verlos. Siempre son y serán un ejemplo de vida, por su pasado, presente y futuro, sus experiencias que me han compartido y amor incondicional, los quiero muchísimo.

**A mi tía Ma. De los Ángeles Arzate Estrada**, te agradezco por ser parte de los recuerdos más bonitos que tengo de mi niñez, además formar parte de mi vida desde que nací y ser parte de los pilares que me dieron el coraje y valor de enfrentar a la vida, recuerda que eres para mí una segunda madre y siempre estaré contigo y te apoyaré y amaré siempre.

**A mi tío José Manuel Hernández Díaz**, siempre te voy a querer por todo el amor y ayuda que me has expresado, además de las enseñanzas de vida que has puesto en mí y sobre todo los buenos momentos que hemos pasado, eres de igual forma como un segundo padre para mí, tienes mi apoyo y amor incondicional.

**A mi Abuelita Amalia Estrada Villegas**, tus enseñanzas, fuerza, templanza, ayuda y amor son inspiración hacia mí, gracias por lo que me has ofrecido.

**A mi Abuelita Eulalia Margarita Vázquez Sánchez**, una compañera de vida eres para mí, además de una prueba de que la vida no es lo que siempre se espera, pero de que siempre es mejor tener la convicción de seguir adelante.

**A mi Primo Manuel Alejandro Hernández Arzate**, eres mi hermano, una de las personas más queridas en mi vida siempre has reflejado lo que yo nunca he podido ser y siempre me muestras un rostro de vida ante la adversidad, sigue adelante te quiero.

**A mi tía Rosa María Arroyo Domínguez**, es muy triste que no esté en mi examen profesional, siempre la voy a querer muchísimo usted formo parte de mi ciclo familiar y marco varios momentos en mi vida, le agradezco todo el apoyo, amor, confianza, paciencia, y lecciones que me enseñó. De igual manera el apoyo que usted le brindo a mis padres al momento de edificar la casa en la que vivimos y sobre todo el apoyo que le dio a mi mamá después de todo lo ocurrido, sé que no es un adiós, ya que usted ahorita fue a preparar el lugar de morada con Dios Padre, la llevaré siempre en mi corazón y pensamientos.

**A mi tío Gerardo Vázquez Sánchez**, tío gracias, sinceramente gracias, no solo por ser usted una persona increíble, si no por el apoyo que usted le brindo a mis papas desde el momento que se unieron y mucho antes por la ayuda brindada a mi mamá y mi abuelita, cuestión por la cual estoy en deuda total con usted y le brindo mi cariño incondicional. Animo que la vida sigue y trae nuevas experiencias, gracias.

**A mi tía Ma. De Lourdes Arzate Estrada**, siempre fue un banco donde descansar, su apoyo incondicional ha sido parte de la inspiración en el día a día, gracias por su amor a mi persona.

**A mi tía Georgina Arzate Estrada**, tía la aprecio mucho ya que siempre me brindo su calidez como familiar y su ayuda a mis padres al momento de mi nacimiento, además de sus buenos deseos y apoyo, gracias.

**A mi prima María de Lourdes González Castro**, eres más que la palabra increíble, eres una persona que me da energía en mi día a día, gracias por el apoyo, enseñanza, comprensión y amor que me has brindado a mí, mis padres y la familia en general, vales mucho y siempre recuerda que cuentas conmigo para lo que necesites.

**A mis primos Gerardo Vázquez Arroyo y Claudia Cruz Silva**, les estaré siempre agradecidos a ambos su ayuda incondicional. Consejos y amor ya que son parte de lo mucho que me han obsequiado, son unas personas increíbles, recuerden que ustedes también tendrán mi ayuda incondicional en lo que ustedes requieran, gracias.

**A mi prima Miriam Vázquez Arroyo**, te quiero y te aprecio siempre contarás conmigo sigue adelante eres una prueba de valor ante la vida.

**Al primo Fernando Rosas Arroyo**, Fer eres genial nunca te he tomado de largo, siempre he valorado tus experiencias que me has contado y atesoro varios recuerdos bonitos contigo, gracias por el apoyo que me has brindado de manera incondicional de igual manera tienes mi respeto, apoyo, amor y cariño sigue adelante.

**A los primos Fabiola Vázquez Arroyo y Arturo**, los amo mucho, gracias por el apoyo y amor que me han brindado, ¡familia siempre y para siempre!

**A mi primo Julián Vázquez Arroyo**, Gracias Julián por el amor y apoyo brindado siempre tendrás mi ayuda.

**A mis primos Ma. Celia Vázquez López y Román Rivera Sierra**, siempre estarán en mi ser, mi vida y tendrán mi apoyo incondicional, no puedo expresarles las gracias suficientes ante el apoyo, ayuda y amor que me han brindado besos y abrazos.

**A los primos José Enrique Vázquez López y Lezly Selena Hernández Campos**, que les puedo decir, los quiero, aprecio, admiro de cierta manera y forman parte de mi vida y familia, no lo olviden cuentan conmigo y mi amor para lo que sea, les deseo mucha felicidad y armonía.

**A los primos Cesar Alejandro Vázquez López y Laura de la Luz Medina**, son personas increíbles, valerosas, amorosas y respetables tienen mi apoyo y cariño

**A los primos de la familia Arzate**, Cabrones se rifan chido...!!!! los quiero mucho.

**A los primos de la familia Vázquez Arroyo**, los quiero y siempre estarán en mi corazón.

**A los primos de la familia Vázquez López**, son geniales y tienen mi apoyo incondicional, ante todo, los quiero.

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM**, es un honor pertenecer a esta institución y el agradecerle el apoyo que me brindó y ofreció para poder ser hoy lo que soy.

**A la Facultad de Ingeniería**, pertenecer a la UNAM es un orgullo, pero pertenecer a la Facultad de Ingeniería es un honor que he podido disfrutar y vivir, cada experiencia obtenida es un lujo que me permite ser lo que soy y lo que seré. Gracias Facultad por todo lo brindado y ofrecido.

Así mismo, se agradece el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, **DGAPA**, por el patrocinio del proyecto **IN115418 “Propuesta de una metodología para la evaluación de la resiliencia estructural sísmica en infraestructura escolar pública”** para la realización de esta tesis.





## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
1.1. Objetivo General	10
1.2. Objetivos Específicos	11
1.3. Justificación	11
1.4. Descripción de la Tesis	12
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1. Salud Estructural	13
2.1.1. Propiedades Dinámicas Estructurales	15
2.2. Espectros de Fourier y Métodos Espectrales	17
2.2.1. Serie y Transformada de Fourier	17
2.2.1.1. Transformada Discreta de Fourier	22
2.2.1.2. Transformada Rápida de Fourier	23
2.2.2. Espectro de Potencia	24
2.2.3. Espectro de Fase Cruzado	25
2.2.4. Función de Transferencia	26
2.2.5. Coherencia	26
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>29</b>
3.1. Identificación de la Estructura en Estudio	29
3.2. Posicionamiento de los Instrumentos de Medición	29
3.3. Medición de los Registros de Velocidades	30
3.4. Procesamiento y Análisis de los Registros de Velocidades	30
3.4.1. Transformada de Fourier	31
3.4.2. Espectro de Potencia	31
3.4.3. Coherencia y Fase	32
<b>4. CASOS DE ESTUDIO</b>	<b>34</b>
4.1. Descripción de Edificios	34
4.1.1. Edificio B, FI UNAM	34
4.1.2. Edificio C, FI UNAM	49
4.2. Obtención de la Información	63

4.2.1. Equipo Empleado	63
4.2.2. Confinuración de la Ubicación de los Equipos en el Edificio B Y C FI, UNAM	65
4.2.3. Registros	67
4.3. Modelación Estructural	69
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
5.1. Periodo de Vibrar del Suelo	72
5.2. Periodos Estructurales de Vibrar	74
5.2.1. Transformada rápida de Fourier (FFT)	74
5.2.2. Espectros de Potencia	78
5.2.3. Espectros de Coherencia	81
5.2.4. Espectros de Fase	86
5.3. Formas Modales	99
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS	107

# **1 INTRODUCCIÓN**

Un sismo siempre ha mostrado un concepto de respeto por la naturaleza, así como un fenómeno de preocupación por la peligrosidad que estos representan para la vida de un ser humano. Dicho lo anterior, el ser humano ha buscado la forma de estudiarlos y, de esta manera disminuir el impacto que estos puedan tener en la sociedad.

El ingeniero civil es el profesionalista que a través de las matemáticas, física y la práctica, ha tenido un papel importante en el diseño de edificaciones considerando las fuerzas sísmicas que se pueden generar en la zona de interés, de tal manera que hoy en día existe una rama ampliamente diseñada para el estudio y cuidado de las estructuras que se construyen llamada “salud estructural”.

Muchas veces al construir cualquier edificación es necesario pensar en cuál va a ser la forma más óptima y costeable de hacerlo, a pesar de que conocer la forma de construir y el costo de hacerlo es importante, dejando a un lado el darle un seguimiento a la estructura para ir revisando la evolución de su comportamiento y, de esta manera, garantizar su funcionalidad e integridad intacta a través de un proyecto de mantenimiento.

La salud estructural, se preocupa por el bien estar de los elementos estructurales presentes en una edificación debido a la ocurrencia de un sismo y al paso del tiempo; el campus central de la Universidad Nacional Autónoma de México tiene más de 60 años en pie, por lo que la mayoría de sus edificaciones fueron construidas mediante los primeros reglamentos de construcción implementados en la Ciudad de México y han resistido el paso de varios sismos importantes en su historia, el evaluarlas es un reto de cada ingeniero civil para poder garantizar la integridad de estas estructuras y atender las que presenten cierto daño con el fin de evitar catástrofes posteriores y su continuo uso por más tiempo.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

En esta tesis se tiene como objetivo evaluar la salud estructural de dos edificios de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, esto a través de identificar sus propiedades dinámicas, por medio de métodos espectrales, haciendo uso de registros de velocidades obtenidas en diferentes puntos de las estructuras ocasionados por vibraciones ambientales.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para este trabajo se tienen como objetivos específicos el determinar las propiedades dinámicas tales como los periodos estructurales de vibrar, del suelo y las formas modales presentes en las estructuras de los edificios B y C de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, empleando sismómetros para la medición y obtención de registros de vibraciones ambientales y el procesamiento de estos por medio del programa desarrollado en LabVIEW (NI, 2018).

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Los edificios que forman parte de la Facultad de Ingeniería son un conjunto de estructuras de uso escolar que tienen en pie un gran número de años, estas estructuras han resistido diversos eventos sísmicos a lo largo de sus años de operación. El primer sismo que soportaron y que representa un punto eje para el diseño de las estructuras a nivel nacional es el sismo de 1985 el cual sacudió la ciudad de México y generó numerosos daños, así mismo el 19 de septiembre de 2017 y 21 de febrero de 2018 ocurrieron dos eventos sísmicos muy importantes, ya que hicieron que las estructuras de dicha facultad, al igual que otros en la Ciudad de México, experimentaran movimientos importantes, lo que deja la incertidumbre de cómo se encuentran hoy en día.

Hoy en día, ante la constante preocupación de conocer como están las estructuras, tanto de la Facultad de Ingeniería como de la Ciudad de México, se ha generado una creciente disciplina dentro de las actividades que realiza un ingeniero civil llamada “monitoreo de la salud estructural”, la cual, como su nombre lo dice, es un estudio que permite estudiar y verificar la salud de la estructura a través del tiempo.

La necesidad de conocer las características actuales (y reales) de las estructuras, en conjunto con el campo de conocimiento de la ingeniería civil, han brindado la oportunidad de realizar un estudio de salud estructural utilizando vibraciones ambientales (con la finalidad de no dañar las estructuras presentes y evitar contratiempos debido a su constante uso de clases), captadas por medio de sismómetros triaxiales en las estructuras de la Facultad de Ingeniería y poder determinar las medidas necesarias para mantener la seguridad del edificio y, por supuesto, de sus ocupantes.

## **1.4 DESCRIPCIÓN DE LA TESIS**

La presente tesis presenta el estudio de las propiedades dinámicas actuales de estructuras escolares, teniendo énfasis en los edificios B y C, presentes en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, haciendo uso del método espectral, mediante la utilización de registros de vibraciones ambientales captados por sismómetros triaxiales con la finalidad de verificar la salud estructural presente en estas edificaciones mediante la comparación de los periodos estructurales y formas modales con el programa SAP2000 (CSI,2018), donde cada capítulo tratará lo siguiente:

El capítulo 1 Introducción, es una explicación general del contenido y objetivos generales y particulares de la tesis presente.

El capítulo 2 Marco Teórico, es una introducción al tema de salud estructural, propiedades dinámicas y el método espectral donde se hace referencia a la transformada de Fourier, espectro de potencia, espectro de fase cruzado, función de transferencia y espectro de coherencia.

El capítulo 3 Metodología, es una explicación general de la forma en que se llevó a cabo la obtención de registros de la vibración ambiental presente en las estructuras.

El capítulo 4 Casos de Estudio, es una descripción detallada de los edificios B y C de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, así como la presentación de la información obtenida, explicación del equipo de medición utilizado y el modelado estructural mediante el programa SAP2000 (CSI, 2018) de los edificios B y C de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El capítulo 5 Análisis de Resultados, presenta los valores obtenidos mediante el análisis por medio del método espectral al momento de obtener los periodos estructurales y las formas modales de los edificios B y C de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y el periodo del suelo.

El capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones, presenta las conclusiones finales del análisis hecho en el capítulo 5 y las recomendaciones para la aplicación del método espectral.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 SALUD ESTRUCTURAL**

El hombre ante la necesidad de protección, ha buscado la forma de edificar un sinnúmero de obras de infraestructura que siempre resistan diversas fuerzas a las que continuamente están sometidas.

México es un país en vías de desarrollo con gran diversidad estructural, donde es posible encontrar, desde estructuras de adobe, hasta grandes edificios de concreto reforzado; muchas de estas estructuras se construyen por albañiles sin la supervisión de un arquitecto o ingeniero, lo que se conoce como autoconstrucción, lo cual conyeva a tener siempre una incertidumbre en la capacidad de resistencia y en el comportamiento que presentarán estas estructuras ante las diversas fuerzas naturales presentes en la región, como los sismos o el viento.

De igual forma, la falta de acciones preventivas ante el deterioro y daño estructural en las obras civiles, trae diversas consecuencias negativas. La más importante es, sin duda, donde se involucra la integridad física de los miembros de una población. En general, aún cuando no se presenten pérdidas humanas, la población se ve afectada de gran manera ante una estructura parcial o totalmente fuera de servicio, debido al daño económico que se presenta, el cual también es de consideración.

Este daño económico puede ser de dos formas, directa e indirecta. En forma directa, debido a los altos costos de reparación y, de manera indirecta, en las actividades económicas humanas que pudieran realizarse dentro de la estructura o cercana a ellas (Cortés, 2011).

Desde finales del siglo XX, la ingeniería civil ha enfocado su atención en la forma de encontrar, de manera oportuna, daños en las estructuras durante su periodo de vida, lo cual ha hecho mediante series de diagnósticos estructurales que incluyen estudios técnicos cuyo objetivo es verificar que la estabilidad y resistencia mecánica de las edificaciones cumplan con los requisitos de normas vigentes de seguridad, sin olvidar los parámetros geológicos y meteorológicos de la zona que puedan afectar a la estructura en dónde se encuentra ubicada (Certicalia, 2019), permitiendo que se desarrollen las labores humanas de forma segura y eficiente.

Consecuentemente, por la necesidad de revisión y ayuda a la sociedad, ha sido necesario la creación de una rama en la ingeniería civil dedicada a la salud estructural.

Al respecto, es posible definir el concepto de salud estructural como la acción temporal o permanente de revisión de una estructura, de tal forma que sea posible obtener información importante como vibraciones ambientales que posteriormente se deben analizar para buscar acciones anormales de comportamiento para su posterior reparación o tratamiento de manera oportuna.

Hoy en día existen muchas empresas de ingeniería que hacen habitualmente un monitoreo de la salud estructural, SHM (por sus siglas en inglés) (Zamora *et al.*, 2016) a las diversas estructuras de un lugar, donde el monitoreo estructural es un método para controlar la seguridad, la integridad y el rendimiento de una estructura, permitiendo el diagnóstico del estado de ésta como un todo, en función del estado de sus diferentes elementos y de los materiales que la componen.

El método de SHM puede realizarse a largo plazo, actualizando periódicamente la información sobre la capacidad de la estructura, y determinar si está puede realizar la función para la cual fue diseñada, previendo su degradación resultante de entornos operativos. También es común su aplicación después de eventos extremos, tales como sismos, para la detección rápida en tiempo “real”, de las condiciones estructurales actuales, proporcionando información confiable sobre la integridad de la estructura (Méndez, 2014).

La forma más común de poder llevar un monitoreo estructural es optando por una revisión periódica de la estructura en todos sus componentes de forma visual, esto con la finalidad de poder observar grietas o fracturas y poder hacer una reparación en el elemento afectado. Esta opción fue la primera forma de poder realizar un diagnóstico estructural.

Otra forma de monitoreo consiste en la colocación de sensores a lo largo de la estructura para detectar la presencia y ubicación de algún daño generado como consecuencia de un sismo o un evento (Ingeniería, 2014), ya sea para revisar el desgaste de las mismas o para llevar a cabo alguna reparación o modificación.

Actualmente la SHM se puede monitorear mediante la aplicación del concepto de Perfil Bío-Sísmico, que es una forma de estimar la capacidad resistente de una estructura ante un sismo, mediante parámetros de comportamientos establecidos como en los Reglamento de Construcción del Distrito Federal 2004, GDF, 2004 o Reglamento de Construcción de la Ciudad de México 2017, GCM, 2017, permitiendo detectar deficiencias en las concepciones o sistemas estructurales propuestos o

existentes, para definir posibles correcciones (Teranishi y García, 2014; GDF, 2004; GCM, 2017).

### **2.1.1 PROPIEDADES DINÁMICAS ESTRUCTURALES**

Una propiedad dinámica, es aquella cualidad que describe a la estructura y a su forma de comportarse ante diversas excitaciones dinámicas, tales como las frecuencias propias de vibrar y sus formas modales asociadas (Zamora *et al.*, 2016).

Cada edificio es un cuerpo único que presentará un comportamiento diferente ante una excitación dinámica que se le aplique, en algunos casos, existe gran incertidumbre de su comportamiento real (Muriá y González, 1995).

En la actualidad, conocer el comportamiento que puede experimentar una estructura a través de la determinación de las propiedades dinámicas, es una actividad que ocupa un amplio campo de investigación. El conocimiento de estos parámetros de forma confiable, juega un papel trascendente en la búsqueda de soluciones racionales para la evaluación del nivel de seguridad que ofrecen a sus usuarios (Silva, 2009).

Existen muchas formas de determinar las propiedades dinámicas de una estructura, las cuales se pueden clasificar en experimental y analítica.

Dentro de la forma analítica, una manera muy convencional en la actualidad es el uso del método de los elementos finitos. Un modelo de elementos finitos se emplea para representar el comportamiento mecánico de una estructura y en ocasiones se utiliza para predecir la respuesta bajo diferentes combinaciones de carga, así como para evaluar su condición actual. Sin embargo, incluso con los grandes avances en el campo del modelado estructural, un modelo de elementos finitos podría llegar a ser una representación deficiente de la realidad (Araiza *et al.*, 2004) debido a las grandes incertidumbres en los datos que se requieren.

Dentro de la forma experimental, existe el monitoreo y medición de vibraciones en un sistema estructural, las cuales se pueden obtener mediante pruebas clasificadas en tres tipos: vibraciones sísmicas, vibraciones forzadas y vibraciones ambientales.

Las medidas de vibración inducidas por sismo se realizan mediante instrumentación sísmica permanente de un sistema estructural, donde se mide la respuesta real de una estructura sometidas a las aceleraciones del terreno provocadas por un evento sísmico. Estas pruebas se dividen en dos tipos: ensayos en laboratorio aplicados a



modelos estructurales a escala, llevados a cabo en mesas vibratoras y los ensayos efectuados a estructuras reales; sin embargo, se tiene la desventaja que para su aplicación en su mayoría requiere la interrupción temporal de las operaciones y acceso limitado a la estructura (Méndez, 2014).

Las vibraciones forzadas, son debidas a demandas de características conocidas que pueden ser existentes o artificiales, impuestas al sistema estructural para fines de registros de sus vibraciones (Zamora *et al.*, 2016; Méndez, 2014).

Las vibraciones ambientales, son producidas por demandas ambientales tales como viento, tránsito vehicular, operación de maquinaria, entre otras, demandas que normalmente existen en condiciones de servicio de la estructura.

Su aplicación requiere de mucho cuidado ya que puede conducir a resultados no adecuados si no se consideran los factores ambientales y antropogénicos, los cuales podrían distorsionar los registros obtenidos de las pruebas experimentales de vibración. Es posible corregir esta alteración de los registros mediante la aplicación de filtros, como un filtro pasa banda delimitado entre 1 a 10 Hertz, (Anguiano, 1996), que eliminan la presencia de ruido (distorsión de alta frecuencia) en las señales (fundamentalmente, las vibraciones ambientales son de muy pequeña amplitud y los períodos de interés para las estructuras están comprendidos entre 0.10s y 10s) (Zamora *et al.*, 2016; Vizconde, 2017).

Respecto a procesamiento de las señales obtenidas de vibraciones ambientales, existen varias técnicas que se utilizan para identificar las propiedades estructurales, una de éstas es mediante el Análisis Modal Operacional (OMA), el cual mide la respuesta de la estructura debido a vibraciones ambientales y a las fuerzas de servicio que actúan sobre ella. Se usa para obtener una descripción modal de la estructura bajo sus condiciones de operación. Se considera que la estructura es excitada por ruido blanco, es decir, el espectro de entrada es constante, todos los modos se excitan igual y el espectro de salida contiene la información completa de la estructura.

Otra forma de procesar las señales es mediante el Análisis Modal Experimental, (EMA, por sus siglas en inglés), que emplea cargas artificiales para producir en mayor frecuencia vibraciones forzadas, aunque también se puede utilizar para obtener vibraciones ambientales.

Tanto la OMA como en la EMA comparten una base teórica común con los procesos de entrada-salida. La principal diferencia es que en el EMA se conoce y se mide la entrada, mientras que en el OMA la entrada es incierta y no se mide (Zamora et al., 2016).

Otro procesamiento es por medio del uso del análisis espectral o también llamado análisis en el dominio de la frecuencia (Zamora et al., 2016), siendo el proceso que cuantifica las diversas intensidades de cada frecuencia (Méndez, 2014).

Este método está centrado en tener un monitoreo instalado de manera temporal en la estructura de interés. Además que el procedimiento tiene varios pasos donde se analizan los registros de vibraciones de la estructura debido a demandas ambientales y/o forzadas (Rodríguez et al., 2014).

- El primer paso en este método es la sincronización de las señales de los equipos de medición con una referencia de tiempo común, llevando a cabo el procedimiento de polarización según la orientación del sensor y el sistema de referencia.
- Posteriormente se lleva a cabo un análisis de los registros en el dominio de la frecuencia, aplicando la transformada de Fourier, para obtener espectros de potencia, de coherencia y de fase, los cuales se describen a continuación (Rodríguez et al., 2014).

## **2.2 ESPECTROS DE FOURIER Y MÉTODOS ESPECTRALES**

### **2.2.1 SERIE Y TRANSFORMADA DE FOURIER.**

Dentro de la ingeniería civil, para llevar a cabo el análisis de las vibraciones ambientales es frecuente el uso de una herramienta matemática llamada serie y transformada de Fourier. Este es un análisis que descompone funciones en términos trigonométricos (senos y cosenos) dentro de una suma (o integral) de las funciones que la componen.

Una de las razones para utilizar los métodos de Fourier es que es posible obtener procesos de manera individual para un componente de entrada y de salida de manera organizada (Huston, 2011), además, las funciones periódicas con frecuencia son bastante complicadas y es deseable representarlas en términos de funciones periódicas simples (UPC, 2019).

La importancia de la transformada de Fourier radica en que las mediciones de vibraciones, ambientales o forzadas, se obtienen en el dominio del tiempo; pero por practicidad es mejor trabajarlas en el dominio de la frecuencia. Para obtener las componentes individuales de cada frecuencia es necesario realizar un análisis espectral por medio de ella.

El concepto denominado serie de Fourier fue introducido en el año de 1822 por el barón de Fourier en un trabajo sobre el proceso de la transmisión del calor. La serie de Fourier permite expresar cualquier función periódica  $f(t)$  que cumpla con las denominadas condiciones de *Dirichlet* por medio de una serie infinita de funciones armónicas. Estas condiciones son las siguientes:

Condiciones Débiles:

- La función periódica, la integral del valor absoluto definida como  $[0, T] \int_0^T |f(t)| dt < \infty$ , donde  $T$  es el periodo, debe ser finita (Figura 2.1).

Condiciones Fuertes

- La función tiene un número finito de discontinuidades finitas en el intervalo  $[0, T]$ .

La función tiene un número finito de extremos relativos en el intervalo  $[0, T]$ . (Hidalgo, 2009; Radaelli, 2007)

En la Figura 2.1 Siendo la función  $\int_{-T/2}^{T/2} |f(t)| dt$  se dice que es continua a tramos en el intervalo de  $[-T/2, T/2]$ , convergiendo en un punto de discontinuidad  $t = t_1$ , la serie converge a  $\frac{1}{2}[f(t_1-) + f(t_1+)]$ , donde  $f(t_1-)$  es el límite de  $f(t)$  cuando  $t$  se aproxima a  $t_1$  por la izquierda y  $f(t_1+)$  es el límite  $f(t)$  de cuando  $t$  se aproxima a  $t_1$  por la derecha (Augusto, 2018).

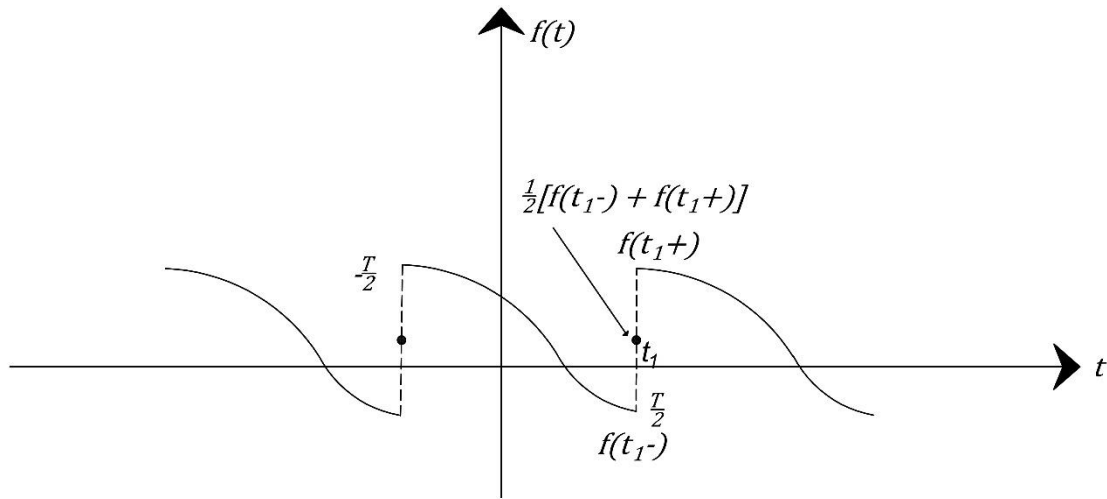


Figura 2.1 Gráfica de la función  $\int_{-T/2}^{T/2} |f(t)| dt$ , donde se muestran las condiciones de Dirichlet

La serie de Fourier armónica se expresa de la forma siguiente:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t)] \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

$a_0, a_1, \dots, b_1, b_2, \dots$  son constantes reales.

$n \in \mathbb{N}$ .

$a_n$  y  $b_n$  están definidos de  $\{a_n\}_{n=0}^{+\infty}$  y  $\{b_n\}_{n=0}^{+\infty}$  y se conocen como coeficientes de la serie.

$\omega$  es la frecuencia circular fundamental

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad \text{Ec. 2}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_a^{a+T} f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad n \geq 0 \quad \text{Ec. 3}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_a^{a+T} f(t) \text{sen}(n\omega t) dt, \quad n \in \mathbb{N} \quad \text{Ec. 4}$$

Fue Cauchy es su trabajo *Théorie de la propagation des ondes* de 1816 el primero en establecer explícitamente la transformada de Fourier (Irrázaval, 1999).

La **transformada de Fourier** puede considerarse entonces como una ampliación del desarrollo de la serie de Fourier al caso de funciones no periódicas (Hidalgo, 2009), que transforma una señal en el dominio del tiempo a otra en el dominio de la frecuencia (Zamora *et al.*, 2016).

Partiendo de una función periódica,  $x(t)$ , con periodo  $T$  y, admitiendo que se ha elegido el sistema de referencia de modo que el valor medio de la citada función es nulo. La frecuencia de cada uno de los armónicos será:

$$f_n = \frac{n}{T} \quad n = 1, 2, \dots, \infty \quad \text{Ec. 5}$$

Además:

$$\Delta f = f_{n+1} - f_n = \frac{1}{T} \quad \text{Ec. 6}$$

donde:

$f$  es frecuencia.

$\Delta f$  es el diferencial de la frecuencia.

Es posible representar a  $f(t)$  por medio de la serie siguiente:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi f_n t) + b_n \sin(2\pi f_n t)] \quad \text{Ec. 7}$$

Sustituyendo en la ecuación 7 los valores de los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  de las ecuaciones 3 y 4, se obtiene la siguiente expresión

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [2\Delta f \left[ \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos(2\pi f_n t) \right] \cos(2\pi f_n t)] \\ + \sum_{n=1}^{\infty} [2\Delta f \left[ \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin(2\pi f_n t) \right] \sin(2\pi f_n t)] \quad \text{Ec. 8}$$

Puede considerarse una función no periódica como el límite de una función periódica cuando el periodo tiende a infinito. En tal caso el valor de  $\Delta f$  tiende a cero y puede representarse por  $df$ . Las sumas que aparecen en la ecuación 8 se convierten en integrales y dicha ecuación se convierte en la siguiente:

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt \right] \cos(2\pi ft) df + 2 \int_0^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sen(2\pi ft) dt \right] \sen(2\pi ft) df \quad \text{Ec. 9}$$

O, si se hace la siguiente consideración

$$A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt \quad \text{Ec. 10}$$

$$B(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sen(2\pi ft) dt \quad \text{Ec. 11}$$

La ecuación 9 se convierte en la siguiente:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f) \cos(2\pi ft) df + \int_{-\infty}^{\infty} B(f) \sen(2\pi ft) df \quad \text{Ec. 12}$$

Y si se define la ecuación compleja  $\vec{X}(f)$ , por medio de la ecuación siguiente:

$$\vec{X}(f) = A(f) - jB(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \text{Ec. 13}$$

Resulta, finalmente:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{X}(f) e^{-2\pi i f t} df \quad \text{Ec. 14}$$

Las ecuaciones 13 y 14 constituyen el par de transformadas de Fourier (Hidalgo, 2009).

### 2.2.1.1 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Para las mediciones de un sistema estructural, la señal medida  $x(t)$  se emplea un analizador digital. Este analizador digital muestra las señales a través de 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 ésta son continuas por lo que la representación de la transformada de Fourier se realiza en forma discreta, en un periodo de tiempo y aplicable a sistemas digitales (García *et al.*, 2002; Zamora *et al.*, 2016). La discretización de una señal continua se hace a través de una operación llamada muestreo (Méndez, 2014). Si se considera una frecuencia de muestreo  $f_s$ , con un número de muestras  $p$  en tiempo y frecuencia, la resolución

$$\Delta f = f_s/p \quad \text{Ec. 15}$$

y el intervalo

$$\Delta t = 1/f_s \quad \text{Ec. 16}$$

La transformada discreta, entonces, se puede expresar a través de las siguientes relaciones (García *et al.*, 2002):

$$F_k = \sum_{i=0}^{p-1} x_i e^{-\frac{j2\pi ik}{p} \Delta t} \quad X_i = \sum_{k=0}^{p-1} F_k e^{\frac{j2\pi ik}{p} \Delta f} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

$j$ , es la unidad imaginaria.

$k = 0, 1, 2, \dots, p - 1$  valor en el dominio de la frecuencia.

$X_i$ , son señales en el dominio de la frecuencia

$F_k, x_i$ , son señales en el dominio del tiempo

La transformada de Fourier discreta permite evaluar una representación espectral (en frecuencias) de una señal discreta por medio de una ventana de tiempo finita. Este análisis es relativamente sencillo y además, eficaz en aplicaciones de

eliminación del ruido que contamina una señal y en otros tipos de filtrados (pasa-bajos, pasa-altos, pasa-banda, etc.) (Méndez, 2014).

Al multiplicar la ecuación 17 por  $\Delta f, Fk$ , entonces, representa una amplitud de densidad espectral. Esta amplitud es la forma final de lo que se conoce como transformada discreta de Fourier, DFT (García et al., 2002):

$$F_k = \sum_{i=0}^{p-1} x_i e^{-j2\pi ik/p} \quad X_i = \sum_{k=0}^{p-1} F_k e^{j2\pi ik/p} \quad \text{Ec. 18}$$

### 2.2.1.2 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La transformada rápida de Fourier, FFT (por sus siglas en inglés) es un algoritmo originalmente presentado por Cooley y Tukey en 1965, el cual permite calcular la transformada de Fourier discreta y su inversa (Méndez, 2014; Zamora *et al.*, 2016).

La implantación directa de la ecuación 18, requiere aproximadamente  $n^2$  operaciones complejas. Sin embargo, cuando el tamaño de la secuencia es  $n = 2m$ , para  $m = 1,2,3, \dots$ , entonces el cómputo de la DFT puede mejorar en aproximadamente  $n \log_2(n)$  operaciones. En procesamiento digital se conoce a este caso particular como la transformada rápida de Fourier. La señal se muestrea de tal manera que produce una cantidad específica de números binarios que representan el segmento de la función de entrada. Estos números se transforman a través de la FFT en valores complejos en el dominio de frecuencias. Cada punto de frecuencia  $A(f)$  se calcula con el promedio de las amplitudes  $A_i$  de acuerdo a la siguiente ecuación (García *et al.*, 2002; Méndez, 2014; Huston, 2011):

$$A(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2(f)} \quad \text{Ec. 19}$$

La FFT toma ciertas ventajas de la ley de distribución de multiplicación y de las respectivas naturalezas de las funciones sinusoidales. La FFT reduce considerablemente los errores de redondeo asociados con la representación en una computadora de los datos numéricos (Zamora *et al.*, 2016; Huston, 2011).



Una vez que se aplica la FFT a las señales medidas de un sistema estructural, se pueden obtener los espectros y funciones del Análisis de Fourier para determinar las propiedades dinámicas de las estructuras, como son las frecuencias, las formas modales y las correspondientes fracciones de amortiguamiento crítico. A continuación, se definen cada uno de estos espectros y funciones (Zamora *et al.*, 2016).

## 2.2.2 ESPECTRO DE POTENCIA

La función de densidad espectral, también conocida como espectro de potencia, es una función que representa la distribución de potencia o energía de la señal con respecto de la frecuencia (Huston, 2011; Zamora *et al.*, 2016; Méndez, 2014).

Obtener el espectro de potencia permitirá estimar las propiedades dinámicas como las frecuencias que pertenecen al sistema estructural y hacer una diferencia con todas las frecuencias arrojadas en la FFT que pertenezcan al suelo y no a la estructura (Henaó *et al.*, 2014)

Un espectro de potencia está definido por la transformada de Fourier de la siguiente manera:

$$S(f) = X^*(f) * X(f) = |X(f)|^2 \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

$S(f)$  es el espectro de potencia.

$X^*(f)$  es el conjugado complejo de  $X(f)$ .

$X(f)$  es la transformada de Fourier de la señal  $x(t)$ .

Al realizar el análisis espectral, se recomienda utilizar el mayor número de registros posible, esto con la finalidad de contar con la señal más representativa del sistema estructural ya que, al realizar un promedio de los espectros de potencia, el ruido registrado y ajeno a las propiedades del sistema tiende a eliminarse.

Para determinar las propiedades dinámicas de una estructura, se requiere, como ya se mencionó, que la información se encuentre en el dominio de la frecuencia, de tal forma que se obtengan las frecuencias propias del sistema en estudio. Para conseguir esto se deben obtener las funciones de ángulos de fase o espectros de

fase, y la función de coherencia entre pares de señales, lo que a continuación se describe (Méndez, 2014; García *et al.*, 2002; Zamora *et al.*, 2016).

### 2.2.3 ESPECTRO DE FASE CRUZADO

Un espectro de fase cruzado o también llamado fase o ángulo de fase, es un conjunto de datos complejos.

La fase o ángulo de fase de las señales,  $\theta_{xy}(f)$ , presenta la información faltante de estas funciones y se obtiene con el cociente de la parte real y la parte imaginaria de la función del espectro cruzado de potencia (Henao, 2019).

Donde:

El espectro cruzado de potencia  $S_{xx}$  entre dos señales  $X(t)$  y  $Y(t)$ , se define como:

$$S_{xx} = X(f) * Y(f) \quad \text{Ec. 21}$$

La fase está dada por las siguientes ecuaciones:

$$G_{xy}(f) = A_{xy}(f) + iB_{xy}(f) \quad \text{Ec. 22}$$

$$|G_{xy}(f)| = \sqrt{A_{xy}^2(f) + B_{xy}^2(f)} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \frac{B_{xy}(f)}{A_{xy}(f)} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

$G_{xy}(f)$ ,  $B_{xy}(f)$ ,  $A_{xy}(f)$  son espectros de potencia que pertenece al campo complejo

Dentro de la ingeniería estructural, el espectro de fase es una herramienta útil para la interpretación e identificación de las formas modales de una edificación, ya que permite indicar la dirección del movimiento de cada nivel de una estructura (Henao, 2019).

Cuando hay un ángulo de fase igual o cercano a  $0^\circ$  indica que los dos puntos correlacionados se mueven en el mismo sentido (lateral o vertical), en cambio un ángulo de fase igual o cercano a  $180^\circ$  indica que ambos puntos se están moviendo en sentido contrario; que en el caso de edificios representa el modo de torsión (Zamora, *et al.*, 2016; Méndez, 2014; García *et al.*, 2002).

#### 2.2.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

Si contamos con un par de señales de aceleración, sean  $X(t)$  y  $Y(t)$ , y además de estas sus correspondientes transformadas de Fourier  $X(f)$  y  $Y(f)$ , podemos obtener sus funciones de transferencia entre estas dos señales, por lo que la función de transferencia se define como el cociente espectral entre los espectros de salida y de entrada (Henao, 2019; Méndez, 2014):

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$H(f)$ , es la función de transferencia.

La función de transferencia, también denominada función de respuesta en frecuencia nos permite encontrar la relación de amplitudes que hay entre dos señales.

Esta función de transferencia también puede obtenerse por medio de los espectros de potencia de las señales y su obtención está dada por la siguiente expresión (Henao, 2019; Méndez, 2014):

$$H(f) = \left| \frac{S_{yy}(f)}{S_{xx}(f)} \right|^2 \quad \text{Ec. 26}$$

Donde

$S_{yy}(f)$  y  $S_{xx}(f)$ , son los espectros de potencia de una señal de entrada y una señal de salida respectivamente.

#### 2.2.5 COHERENCIA

Para el cálculo de frecuencias por medio del espectro de Fourier y el espectro de potencia, obtenidos de las señales de vibración ambiental, se identifican las frecuencias correspondientes a los picos más sobresalientes de estos espectros,

mismas que corresponden a las frecuencias propias del sistema estructural, no todos los picos máximos corresponden a las frecuencias propias de la estructura, ya que algunos son consecuencia de las fuerzas de excitación y del ruido. En la mayoría de los casos no es suficiente analizar sólo las amplitudes de los espectros de Fourier y potencia, por lo que se recurre a la función de coherencia (Zamora *et al.*, 2016).

Dos señales medidas simultáneamente en diferentes partes de un sistema pueden, o no estar físicamente relacionadas (Huston, 2011). Con base en esta hipótesis, la función de coherencia es entonces una medida de la consistencia que existe entre las señales de entrada y salida, es decir, qué tanto se puede afirmar que la señal de salida es producto únicamente de la señal de entrada o existen otro tipo de señales (ruido) que afectan la señal de salida. Matemáticamente, para sistemas lineales, la función de coherencia puede ser interpretada como la porción fraccional del promedio cuadrado en la salida  $Y(t)$  que es contribuido por la entrada  $X(t)$  en una frecuencia específica  $f$  y está dada por la siguiente ecuación (Méndez, 2014; García *et al.*, 2002):

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

$\gamma_{xy}^2(f)$ , es la función de coherencia entre dos señales.

$H_1(f)$  y  $H_2(f)$  Es la función de transferencia

$G_{xx}(f)$ ,  $G_{xy}(f)$ ,  $G_{yy}(f)$ , Son los espectros de potencia asociados a cada dirección en el campo complejo.

La coherencia es una función que desde el punto de vista práctico se interpreta como una forma de medir qué tan semejantes son dos señales (Akonic, 2019), la cual es una medida en el dominio de la frecuencia entre dos señales y es adimensional (Huston, 2011). Esta medición varía entre 0 y 1, o bien, entre 0% y 100%; 1 o 100% significa que las dos señales son exactamente iguales (la misma señal), por otro lado, 0 o 0% indica que son totalmente diferentes. En la práctica,

valores superiores al 60% se aceptan como una fuerte semejanza (Akonic, 2019; Méndez, 2014; García *et al.*, 2002).

Cuando la función de coherencia es mayor que cero, pero menor o igual que la unidad, se debe a una o más de las siguientes razones (Henao, 2019):

- Presencia de ruido extraño presente en las mediciones.
- Errores de resolución presente en las estimaciones espectrales.
- El sistema que relaciona  $Y(t)$  con  $X(t)$  no es lineal.
- La salida  $Y(t)$  se debe a otras entradas además de  $X(t)$ .

La coherencia entre dos señales confirma si las frecuencias identificadas en los espectros de Fourier y de potencia de cada una de las señales son frecuencias propias del sistema estructural; una coherencia con un valor cercano a cero indica que la frecuencia identificada tiene una cantidad de ruido importante y no se considera como una frecuencia propia de la estructura (Zamora *et al.*, 2016).

### **3. METODOLOGÍA**

Para poder realizar un análisis de señales para determinar las propiedades dinámicas de las edificaciones empleando registros de vibraciones ambientales, se recomienda la siguiente metodología:

#### **3.1 IDENTIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO**

Es necesario identificar el edificio que se desea estudiar, conocer su configuración estructural (forma del edificio) y las actividades que se realizan en él. Lo anterior con el objetivo de identificar la ubicación del centro de masas de la estructura y poder determinar, de mejor manera, el movimiento del edificio, ya sea de translación o rotación. Así mismo, es necesario tener noción de las actividades que se realizan en la estructura, esto por si existiera algún uso de maquinaria que esté en contacto cercano a los equipos que se coloquen para evitar que interfirieran con la medición y pudiera generar ruido.

#### **3.2 POSICIONAMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

Para llevar a cabo la obtención de los diversos registros sísmicos se utilizan sismómetros triaxiales, que captan las vibraciones ambientales de la estructura y la convierten en impulsos eléctricos para su posterior análisis.

Cada sismómetro se debe orientar con respecto al norte geográfico para que haya coherencia y uniformidad en las mediciones y al momento de obtener los registros.

Del mismo modo, es necesario utilizar varios equipos de manera simultanea para tener una lectura sincronizada con cada registro, con el fin de garantizar que los archivos tengan el mismo número de datos y duración para al momento de analizar la coherencia y el ángulo de fase de las señales se pueda tener valores de comparación. Una forma fácil que se propone utilizar para poder tener control al momento de inicio y termino de una lectura es por medio del uso del GPS, permitiendo sincronizar los equipos de trabajo con la hora global.

Es importante destacar dónde se colocará cada equipo sobre la estructura que se estudiará, el acomodo se hace dependiendo de lo que se desea obtener de la estructura, ya sea un modo de torsión o traslación, enfocandonos en los lugares donde se obtengan las mayores amplitudes posibles para poder caracterizar los

efectos esperados, a lo cual se recomienda contar con información (planos estructurales) de la estructura o visitarla para generar un levantamiento geométrico de esta, antes de colocar los equipos, con el fin de captar el movimiento presente de manera clara lo mejor posible.

### 3.3 MEDICIÓN DE LOS REGISTROS DE VELOCIDADES.

Una vez colocados los equipos, es recomendable hacer mediciones de más de 10 minutos, al igual que de 5 mediciones en adelante para poder obtener una mejor medición y poder captar cada movimiento presente en la estructura, la Figura 3.1 muestra el registro de una señal graficada en tres direcciones presentes en una estructura.

Es necesario sincronizar el periodo de tiempo de grabación de cada equipo para tener archivos con los mismos grupos de datos.

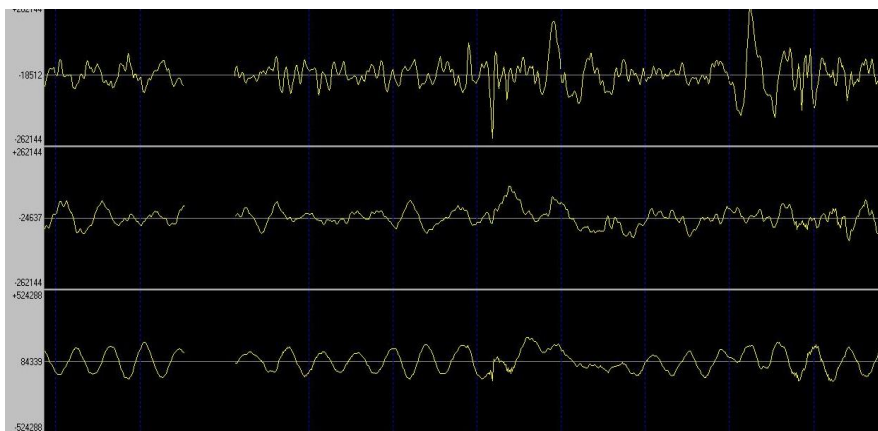


Figura 3.1. Registro de señales en tres direcciones N-S, E-W, Vertical.

Es recomendable realizar más de una medición debido al ruido que se pudiera presentar en cada medición

### 3.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE VELOCIDADES

Una vez que se obtienen los registros sísmicos, se continua con un análisis por medio de espectros de Fourier y métodos espectrales.

### 3.4.1 TRANSFORMADA DE FOURIER

La primera parte del análisis consiste en obtener la transformada de Fourier, donde se grafican los valores obtenidos y se obtienen las diversas frecuencias, las cuales estarán asociadas a los periodos estructurales de vibrar, un ejemplo de esto se presenta en la figura 3.2 donde se grafican valores de un estudio de vibración ambiental en una plataforma marina.

Es recomendable utilizar un filtro para cada señal, esto con el fin de eliminar el ruido en las lecturas y obtener datos más precisos.

Si se realizó más de una medición se debe obtener un promedio global de los resultados con el fin de conjuntar la información obtenida.

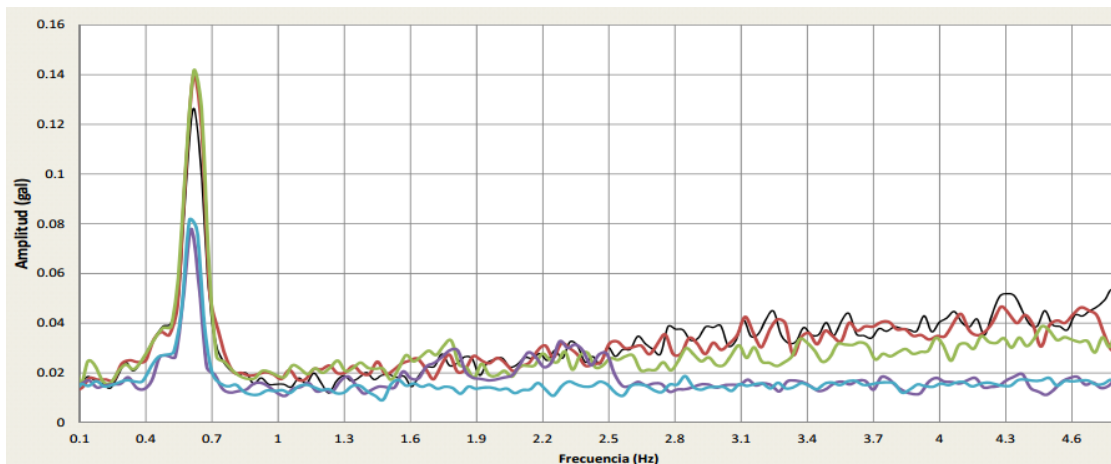


Figura 3.2 Gráfica con los espectros de Fourier encontrados en la medición de una plataforma marina por método de vibraciones ambientales (Méndez, 2014).

### 3.4.2 ESPECTRO DE POTENCIA

Después de obtener la transformada de Fourier, es necesario obtener los espectros de potencia (Figura 3.3), los cuales dan la certeza de que los periodos encontrados con la transformada de Fourier pertenecen a la estructura estudiada.



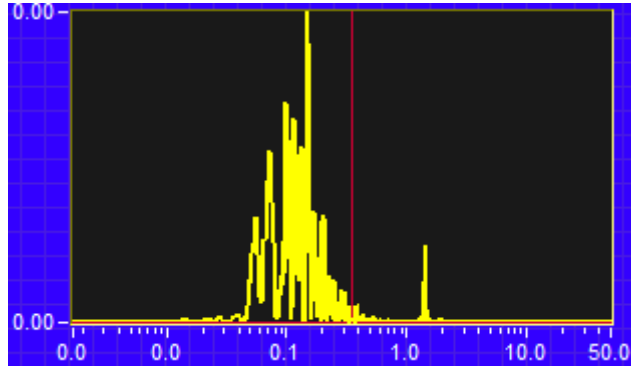


Figura 3.3 Gráfica de espectro de potencia obtenido en la medición de un edificio escolar.

### 3.4.3 COHERENCIA Y FASE

Los datos y la gráfica de fase (Figura 3.4) describirán el movimiento que se presenta en la estructura (traslación o rotación), mientras que la gráfica de coherencia (Figura 3.5) dará la certeza de que los valores de fase que se obtuvieron tienen relación con la estructura y que no son valores con ruido.

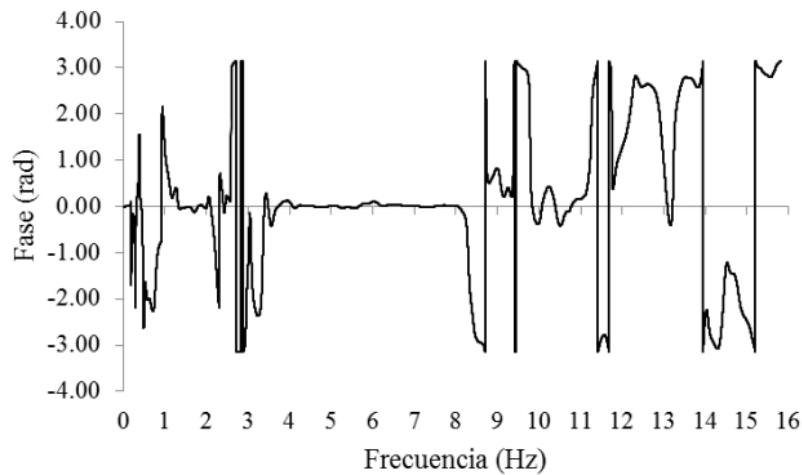


Figura 3.4 Gráfica de Fase obtenida de la medición de un edificio por medio de vibraciones ambientales (Henao et al., 2014).

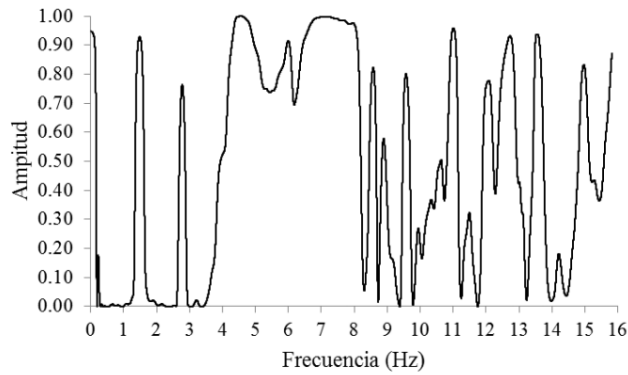


Figura 3.5 Gráfica de Coherencia obtenida de la medición de un edificio por método de vibraciones ambientales (Henaó et al., 2014)

La siguiente Figura 3.7 muestra el mapa conceptual donde se muestra la metodología con los pasos a seguir desde la identificación estructural hasta la obtención de resultados.



Figura 3.7 Mapa conceptual de la Metodología empleada.

## 4. CASOS DE ESTUDIO

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE EDIFICIOS.

#### 4.1.2 EDIFICIO B, FI UNAM

El edificio B de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, (FI, UNAM), es una obra que se construyó en el periodo 1952–1954, durante el sexenio del presidente Adolfo Tomás Ruiz Cortines, como parte de la construcción de la Ciudad Universitaria de la UNAM, diseñada por los arquitectos Mario Pani y Enrique del Moral, donde la proyección arquitectónica de diseño visualizaba una propuesta en planta en forma de “L”.

Su construcción y diseño se realizó considerando las normas técnicas vigentes del reglamento de las Construcciones y de los Servicios Urbanos en el Distrito Federal de 1942 (DDF, 1942).

La Figura 4.1, es una fotografía que muestra la construcción del edificio B de la FI, UNAM (FI UNAM, 2019).



*Figura 4.1. Construcción Ed. B FI, UNAM, (FI UNAM, 2019)*

Se ubica en la zona del Pedregal de San Ángel sur, pertenece al conjunto norte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, la Figura 4.2 es un mapa que muestra la ubicación del edificio en estudio y de la Facultad de Ingeniería dentro de la Ciudad Universitaria de la UNAM.



Figuras 4.2. Ubicación de la Facultad de Ingeniería, UNAM

La Figura 4.3 muestra la ubicación del edificio B dentro de las instalaciones del conjunto norte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.



Figuras 4.3. Acomodo de Edificios en el conjunto norte de la Facultad de Ingeniería, Ed. B

La Figura 4.4 muestra una vista en la actualidad del edificio B, este edificio es una estructura de concreto reforzado de 6 niveles, Planta Baja (PB), Nivel 1 (N1), Nivel 2 (N2), Nivel 3 (N3), Nivel 4 (N4) y Azotea (Az), con una superficie total de 4,310 m<sup>2</sup> construidos por planta.



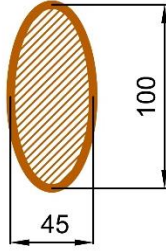
*Figura 4.4 Vista actual del edificio B FI, UNAM*

En planta baja están ubicadas diversas oficinas donde se pasa asistencia a los profesores y al personal que trabaja en la facultad, además de bodegas de intendencia y libros.

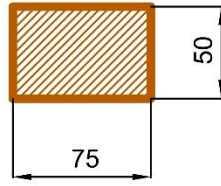
Cada nivel se encuentra dividido en salones, teniendo en el último nivel espacio para un laboratorio. La azotea cuenta con un observatorio astronómico (Zumaya, 2011).

La construcción cuenta con marcos ortogonales en dos direcciones, integrados por columnas de concreto de forma circular, elipse y rectangulares (Figuras 4.5), travesaños primarios y secundarios del nivel 1 y 2 (Figura 4.6), nivel 3 y 4 (Figura 4.7) y nivel 4 y azotea (Figura 4.8) y un sistema de piso a base de losas macizas de concreto reforzado y muros de mampostería. Teniendo el edificio B un peso total de: 3,692.52 tonf. (Zumaya, 2011)

COLUMNA 1 (C1)



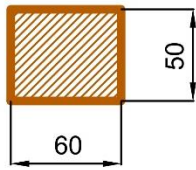
COLUMNA 2 (C2)



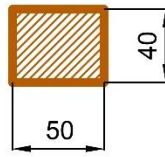
COLUMNA 3 (C3)



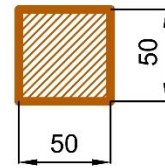
COLUMNA 4 (C4)



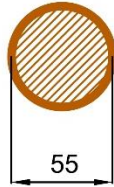
COLUMNA 5 (C5)



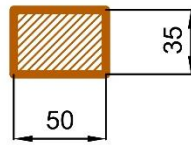
COLUMNA 6 (C6)



COLUMNA 7 (C7)



COLUMNA 8 (C8)



COLUMNA 9 (C9)



Figura 4.5 Columnas edificio B FI, UNAM

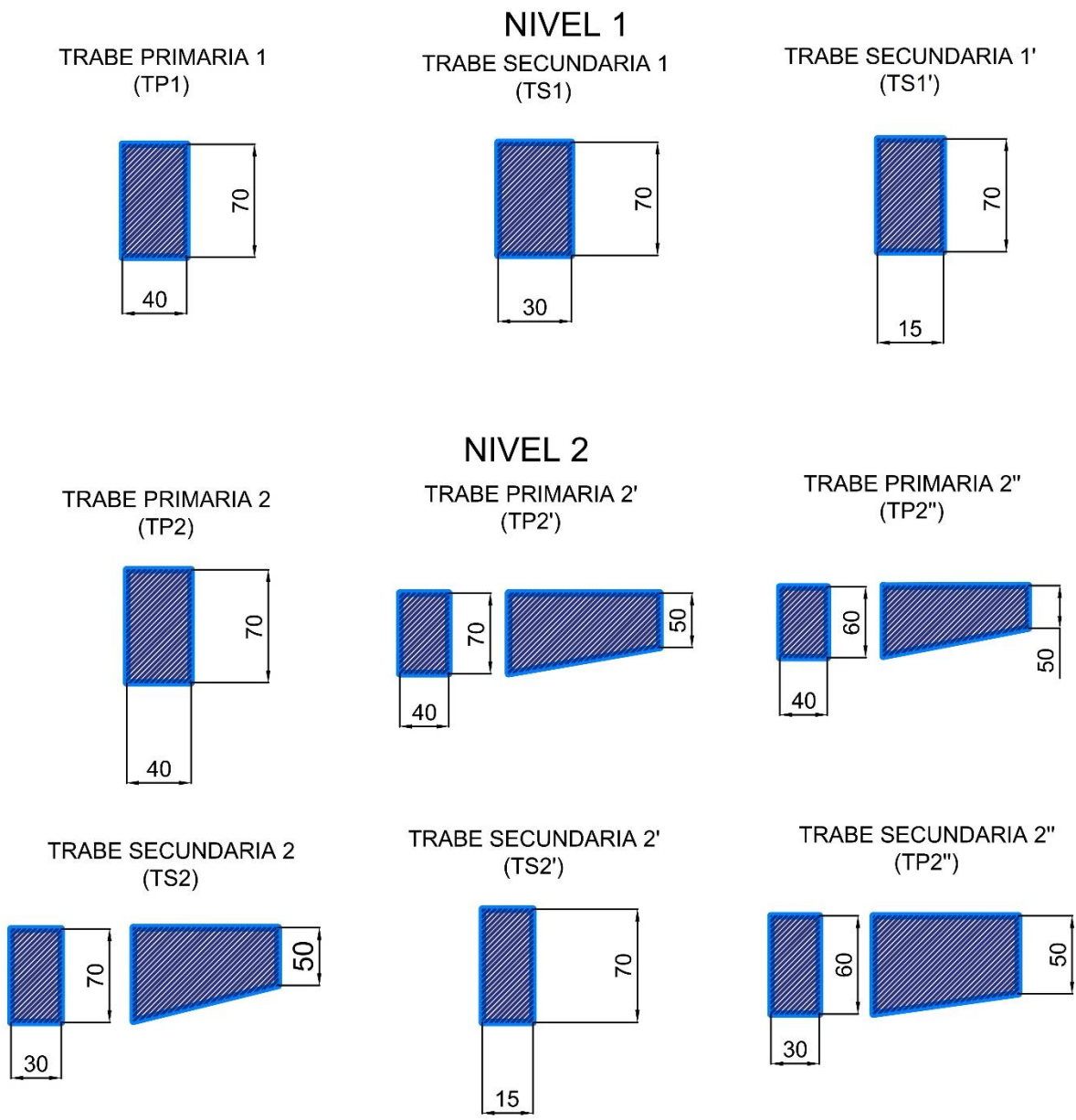
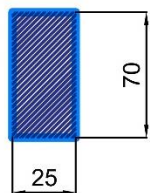


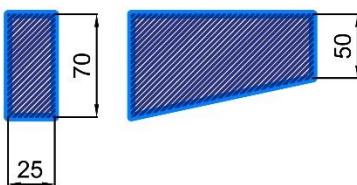
Figura 4.6 Trabes edificio B para los niveles 1 y 2

### NIVEL 3

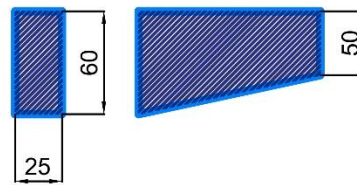
TRABE PRIMARIA 3  
(TP3)



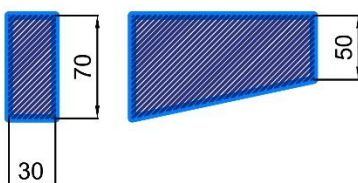
TRABE PRIMARIA 3'  
(TP3')



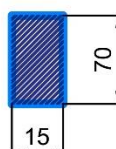
TRABE PRIMARIA 3''  
(TP3'')



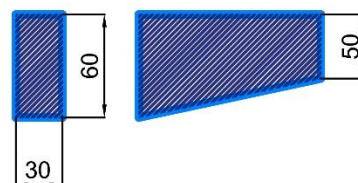
TRABE SECUNDARIA 3  
(TS3)



TRABE SECUNDARIA 3'  
(TS3')

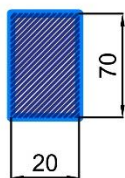


TRABE SECUNDARIA 3''  
(TP3'')

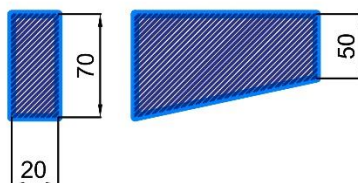


### NIVEL 4

TRABE PRIMARIA 4  
(TP4)



TRABE PRIMARIA 4'  
(TP4')



TRABE PRIMARIA 4''  
(TP4'')

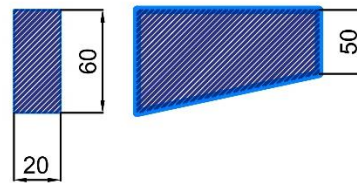
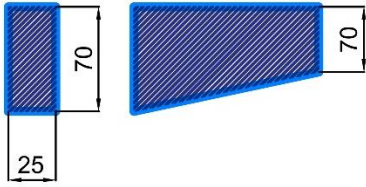


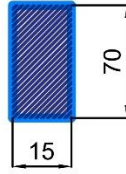
Figura 4.7 Trabes edificio B para los niveles 3 y 4



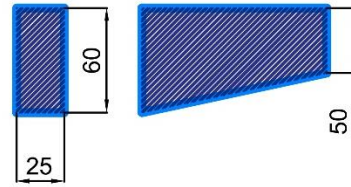
TRABE SECUNDARIA 4  
(TS4)



TRABE SECUNDARIA 4'  
(TS4')

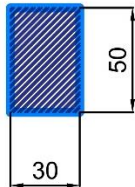


TRABE SECUNDARIA 4''  
(TP4'')

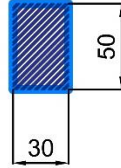


## AZOTEA

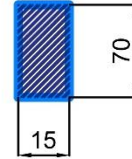
TRABE PRIMARIA 5  
(TP5)



TRABE SECUNDARIA 5  
(TP5)



TRABE SECUNDARIA 5'  
(TS5')



TRABE SECUNDARIA 5''  
(TP5'')

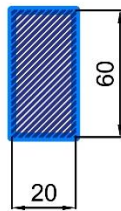


Figura 4.8 Trabes edificio B para los niveles 4 y azotea

La estructura cuenta con 10 ejes en sentido longitudinal designados, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 con una distancia entre ellos de 5.40 m y con volados de 1.24 m respecto al eje 1 y 1.15 m respecto al eje 10, teniendo una longitud total de 50.99 m. En dirección transversal, se tienen cuatro ejes designados, A, B, C, D, con una distancia entre ellos de 5.10 m, 3.00 m y 7.20 m con unos volados de 1.7 m respecto al eje A y 1.07 m respecto al eje D, presentando una longitud transversal de 18.07 m. (Figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14), (Zumaya, 2011). Con altura de entrepisos mostradas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Altura de entrepisos y cotas edificio B

Nivel	Altura de entrepisos (m)	Cotas (m)
<b>Planta Baja</b>	0.00	+0.00
<b>Nivel 1</b>	5.00	+5.00
<b>Nivel 2</b>	4.00	+9.00
<b>Nivel 3</b>	4.00	+13.00
<b>Nivel 4</b>	4.00	+17.00
<b>Azotea</b>	4.00	+21.00

Así mismo, en la Tabla 4.2 se presentan las propiedades de los materiales con la resistencia a compresión del concreto, acero de refuerzo y mampostería:

Tabla 4.2 Propiedades de los materiales empleados en el edificio B

Propiedad por material	Valor
<b>Concreto:</b>	
Resistencia en columnas	$f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$
Resistencia en trabes	$f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$
Peso volumétrico	$2,400 \text{ kgf/cm}^3$
Módulo de elasticidad	$E_c = 12,000\sqrt{210} = 173,896 \text{ kgf/cm}^2$
<b>Acero de refuerzo</b>	
Resistencia en columnas	$f_y = 2,300 \text{ kgf/cm}^2$
Resistencia en trabes y losas	$f_y = 2,300 \text{ kgf/cm}^2$
<b>Mampostería</b>	
Piedra Braza	

Propiedad por material	Valor
<b>Peso volumétrico</b>	2.6 t/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	E = 295,261.96 kgf/cm <sup>2</sup>
Ladrillo Hueco	
Peso volumétrico	1.8 t/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	Em = 7,000 kgf/cm <sup>2</sup>

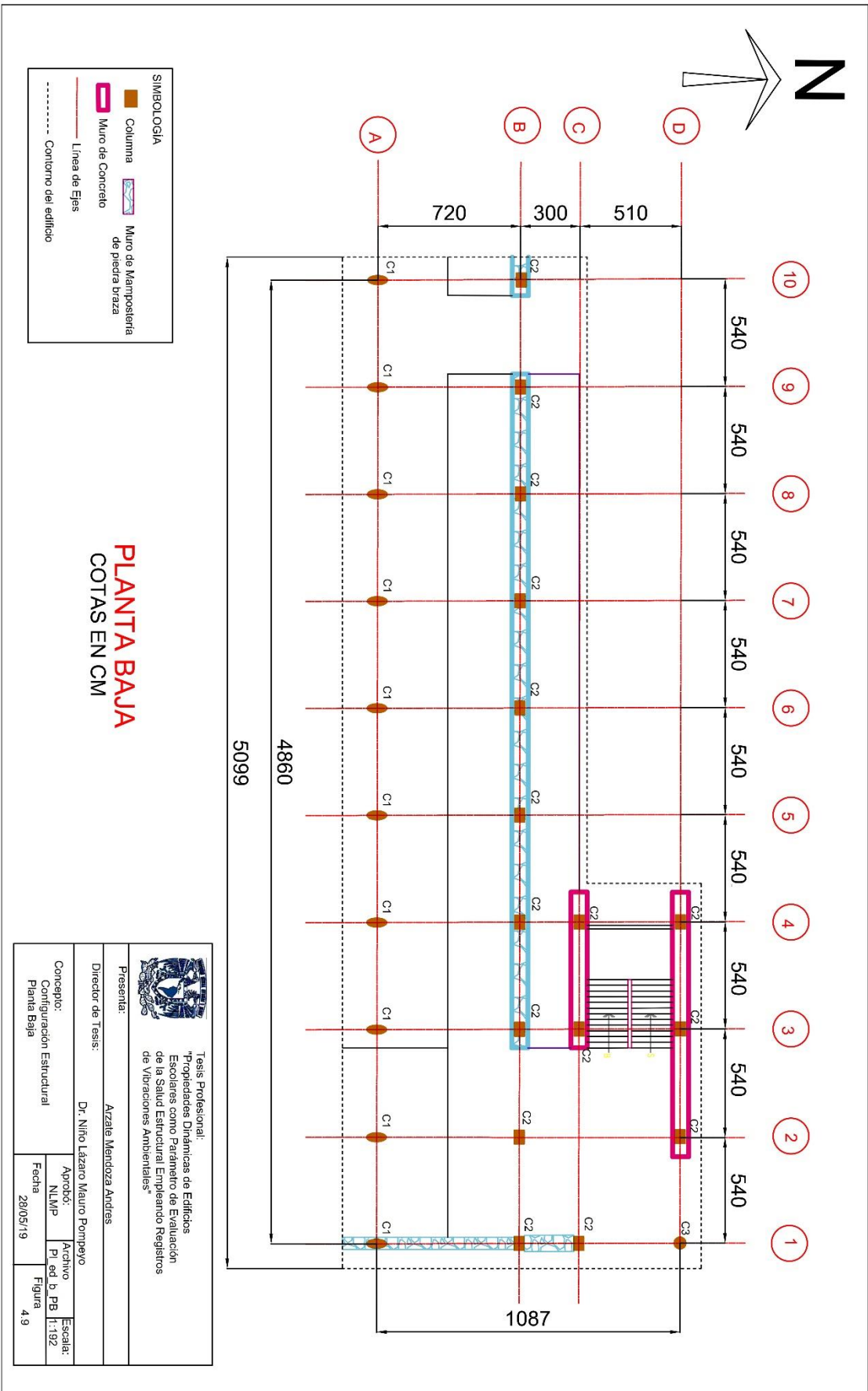


Figura 4.9 Planta estructural planta baja edificio B FI, UNAM

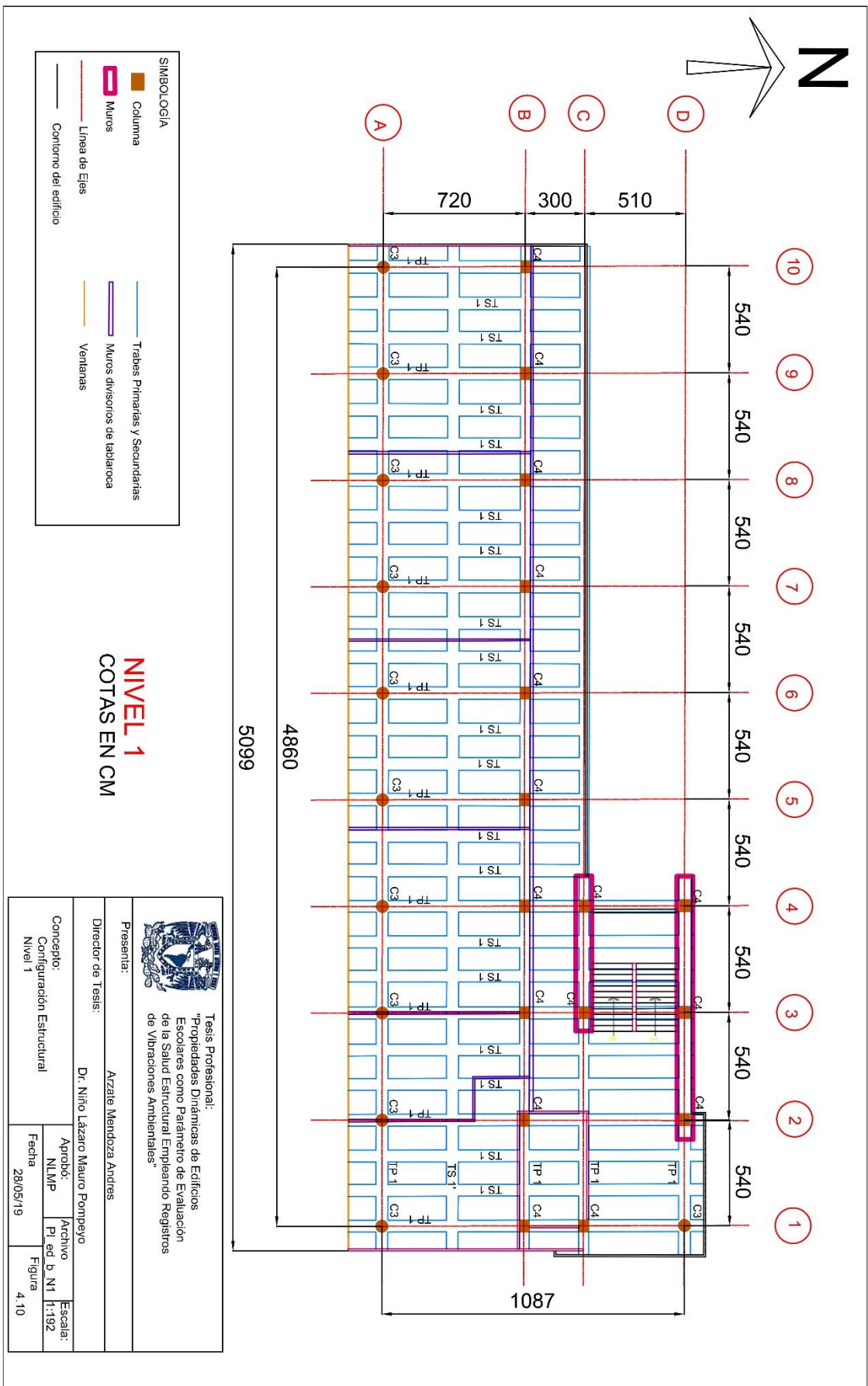


Figura 4.10 Planta estructural nivel 1 edificio B FI, UNAM

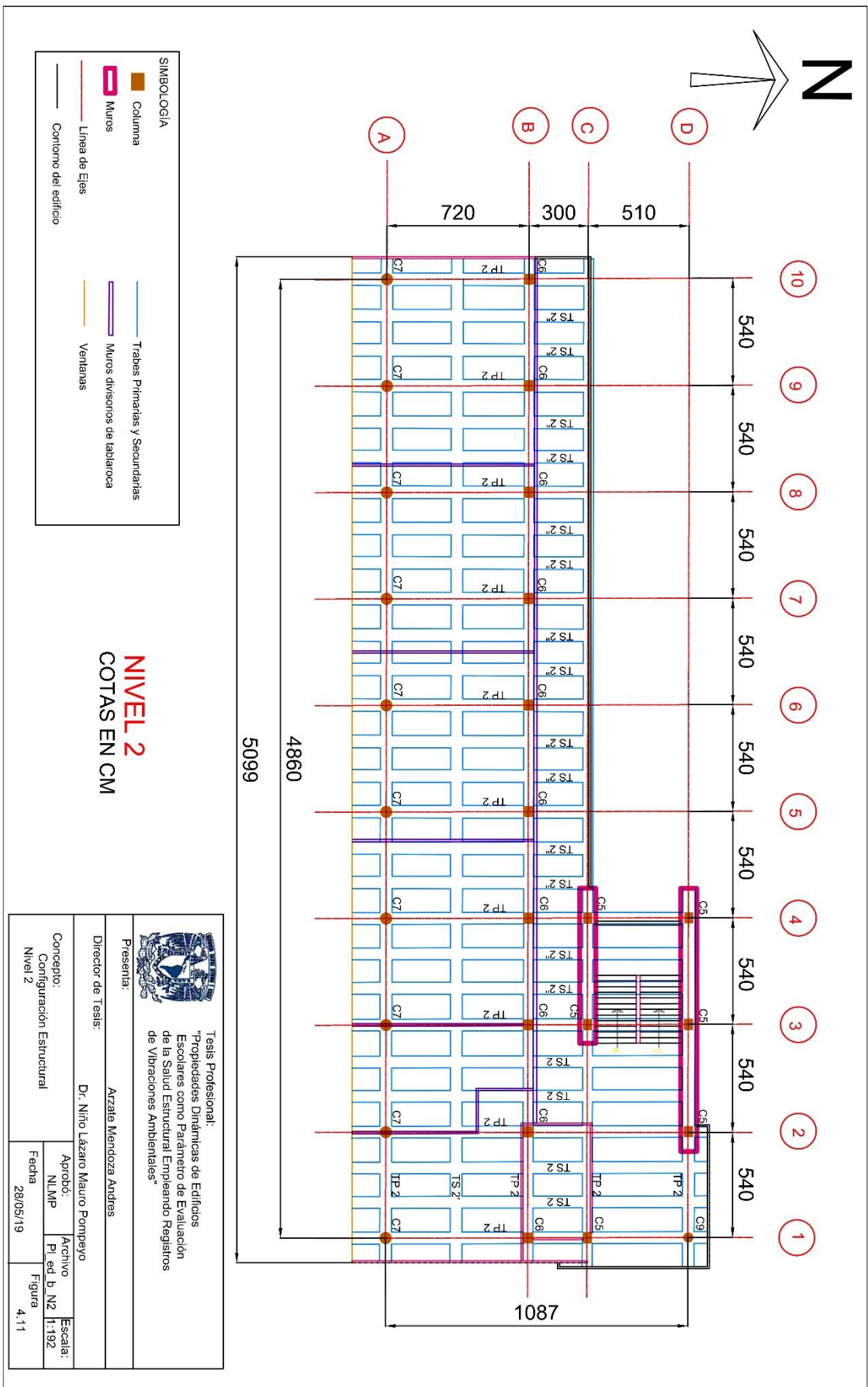


Figura 4.11 Planta estructural nivel 2 edificio B FI, UNAM

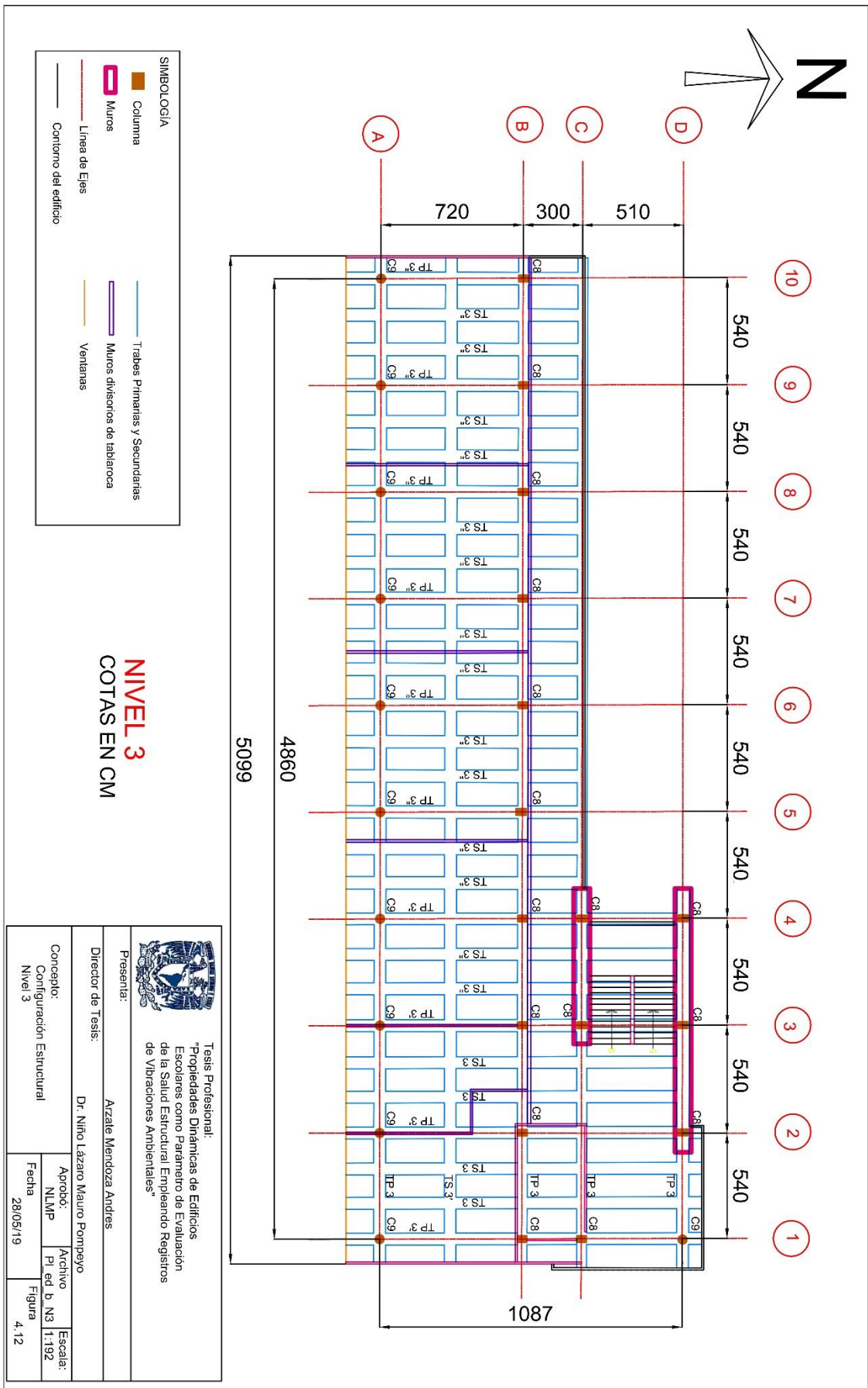


Figura 4.12 Planta estructural nivel 3 edificio B FI, UNAM

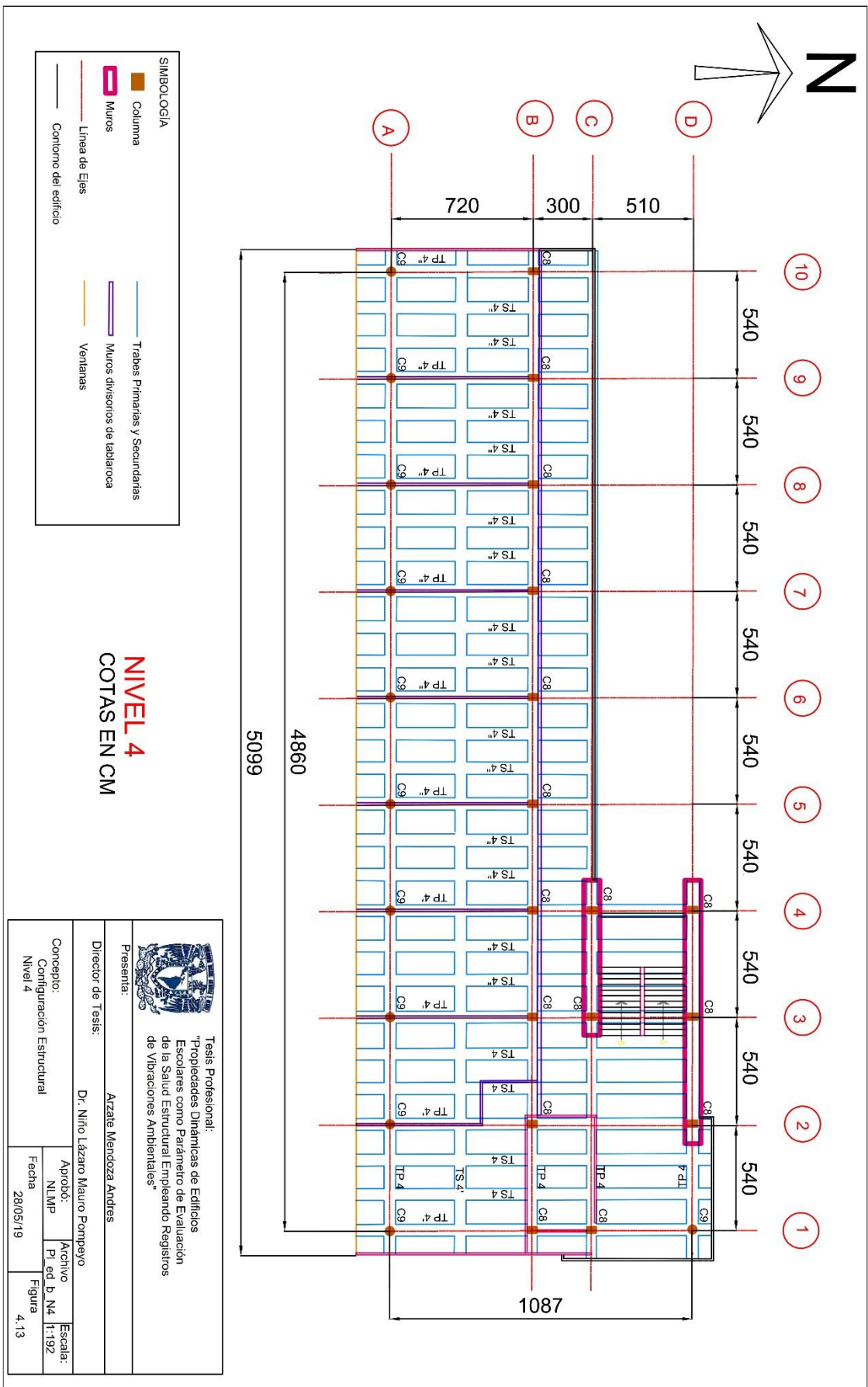


Figura 4.13 Planta estructural nivel 4 edificio B FI, UNAM



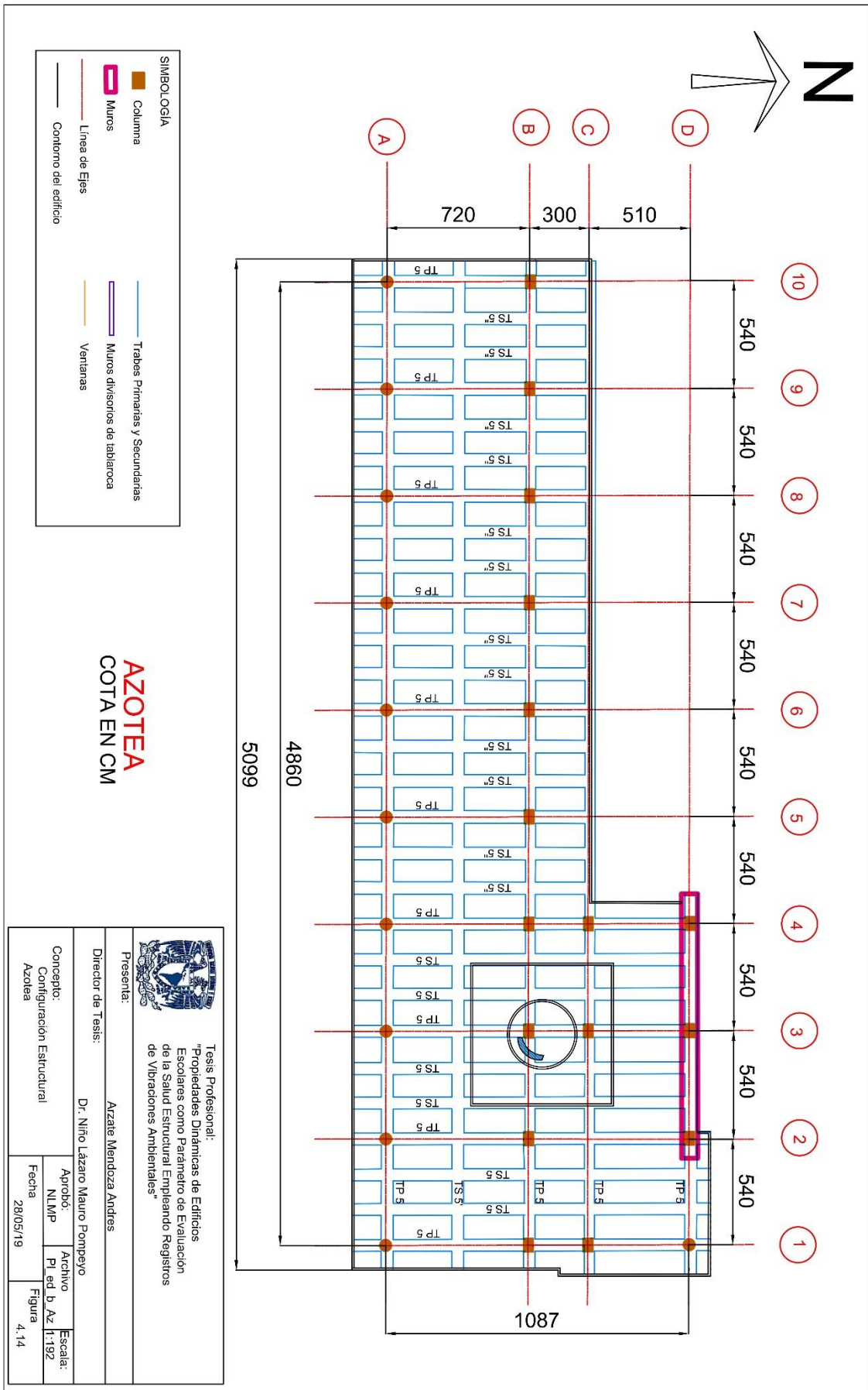


Figura 4.14 Planta estructural azotea edificio B FI, UNAM

#### 4.1.2 EDIFICIO C, FI UNAM

El edificio C de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, es una estructura que se construyó después del edificio B, su edificación se inició en 1964 como parte de la construcción de la Ciudad Universitaria de la UNAM.

Su construcción y diseño se realizó considerando las normas técnicas vigentes del reglamento de Construcciones para Distrito Federal de 1966 (DDF, 1966).

Está ubicado en la zona de Pedregal de San Ángel sur pertenece al conjunto norte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. La Figuras 4.15 es una vista del mapa de Ciudad Universitaria de la UNAM que muestra la ubicación de la Facultad de Ingeniería y en la Figura 4.16 se presenta una vista del conjunto norte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM que muestra la ubicación del edificio en cuestión.

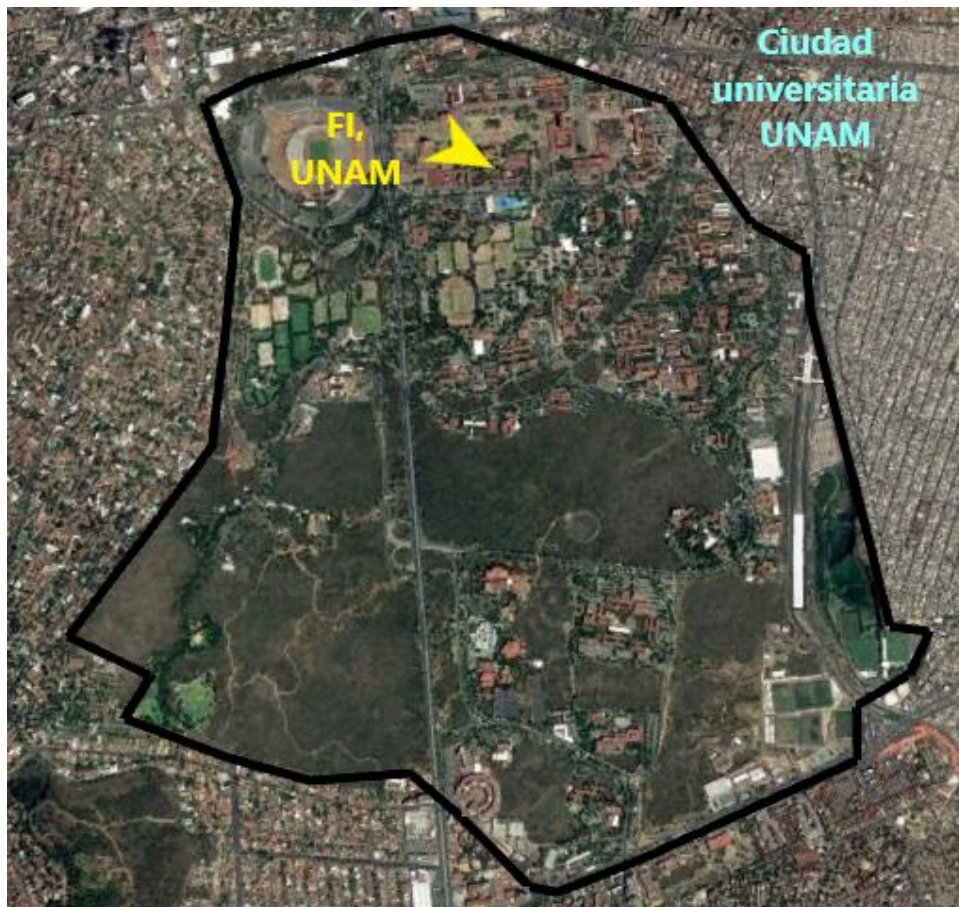


Figura 4.15. Ubicación de la Facultad de Ingeniería, UNAM



Figura 4.16. Acomodo de Edificios Facultad de Ingeniería, Ed. C

En la Figura 4.17 se presenta una vista actual del edificio C de la FI, UNAM



Figura 4.17. Vista del edificio C FI, UNAM

Este edificio es una estructura de concreto reforzado de 6 niveles, Planta Baja (PB), Nivel 1 (N1), Nivel 2 (N2), Nivel 3 (N3), Nivel 4 (N4) y Azotea (Az), con una superficie total de 4,335 m<sup>2</sup> construidos. Con alturas de entrepisos mostradas en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Altura de entrepisos y cotas edificio C

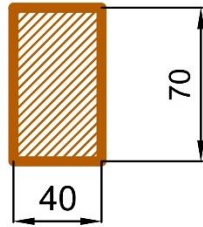
Nivel	Altura de entrepisos (m)	Cotas (m)
<b>Planta Baja</b>	0.00	+0.00; +0.75; +1.00
<b>Nivel 1</b>	5.00	+5.00
<b>Nivel 2</b>	4.00	+9.00
<b>Nivel 3</b>	4.00	+13.00
<b>Nivel 4</b>	4.00	+17.00
<b>Azotea</b>	4.00	+21.00

En planta baja están ubicadas instalaciones de plomería y herrería utilizadas para arreglos de las instalaciones.

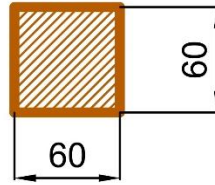
Cada nivel se encuentra dividido en salones, y cuenta en el lado norte con un elevador en todos los niveles desde la planta baja hasta el nivel 4.

La construcción cuenta con marcos ortogonales en dos direcciones, integrados por columnas de concreto de forma circular, elipse y rectangulares (Figuras 4.18), trabes primarias y secundarias del nivel 1 a la azotea (Figuras 4.19, 4.20 y 4.21), sistema de piso a base de losas macizas, muros de mampostería y de concreto reforzado.

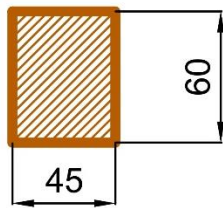
COLUMNA 1 (C1)



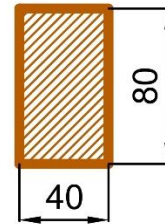
COLUMNA 2 (C2)



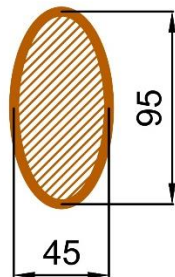
COLUMNA 3 (C3)



COLUMNA 4 (C4)



COLUMNA 5 (C5Y)



COLUMNA 5 (C5X)

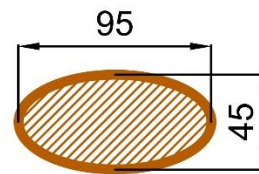


Figura 4.18 Columnas del edificio C FI, UNAM

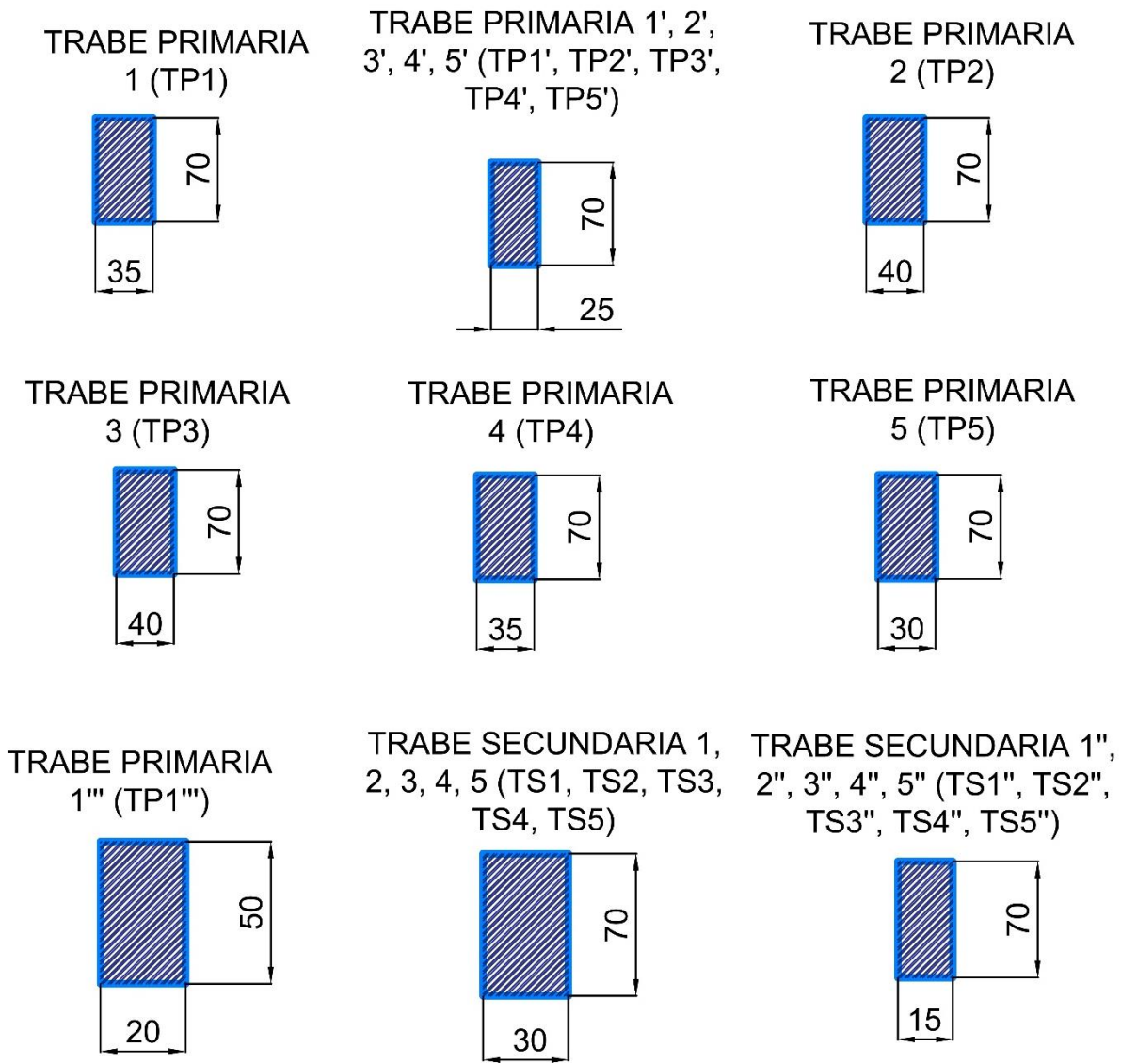
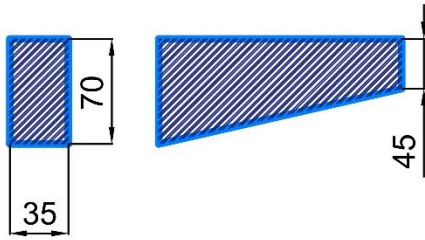
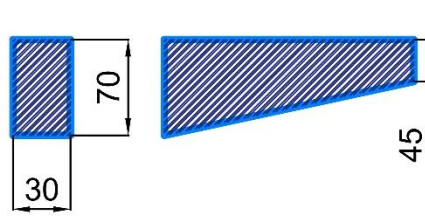


Figura 4.19 Trabes edificio C FI, UNAM; nivel 1 a azotea

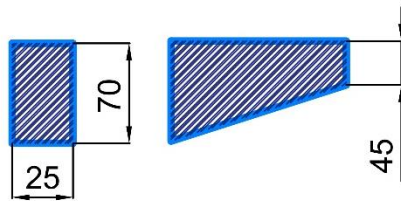
TRABE PRIMARIA  
1" (TP1")



TRABE SECUNDARIA 1', 2', 3', 4',  
5' (TS1', TS2', TS3', TS4', TS5')



TRABE SECUNDARIA 1''', 2''',  
3''', 4''', 5''' (TS1''', TS2''', TS3''',  
TS4''', TS5''')



TRABE SECUNDARIA 1''''', 2''''', 3''''',  
4''''', 5''''' (TS1''''', TS2''''', TS3''''', TS4''''',  
TS5''''')

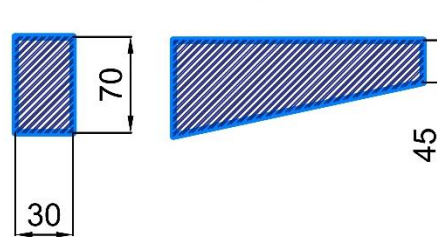


Figura 4.20 Trabes edificio C FI, UNAM; nivel 1 a azotea

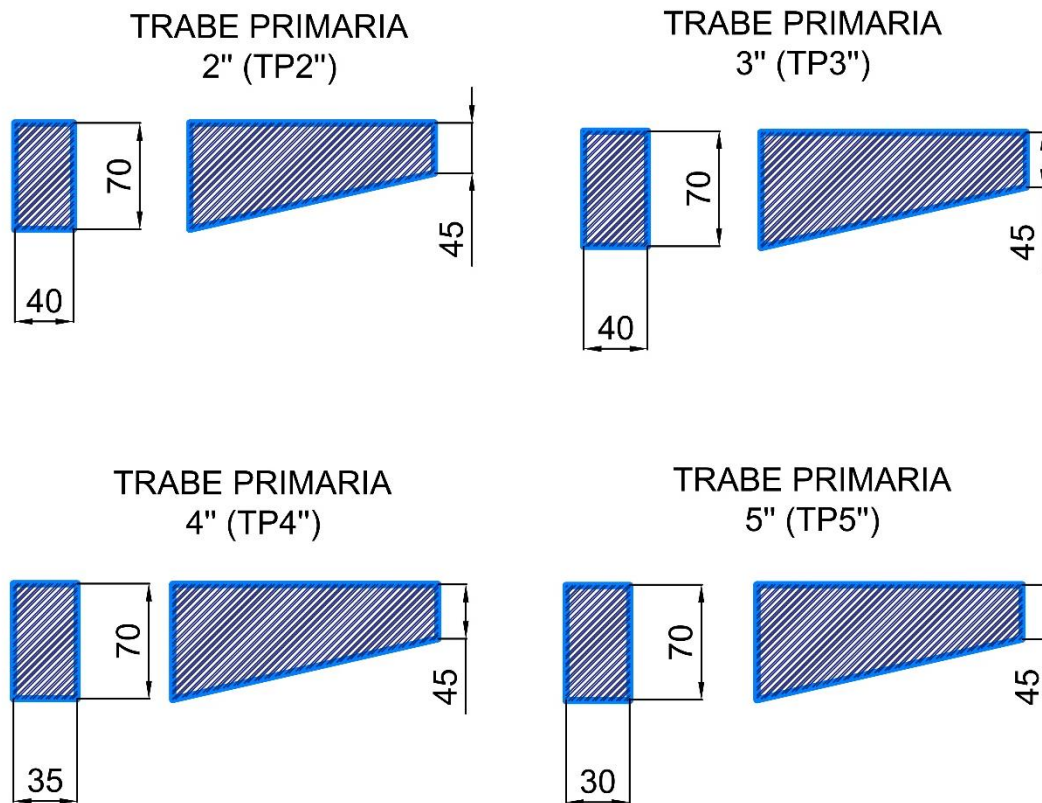


Figura 4.21 Trabes edificio C FI, UNAM; nivel 1 a azotea

El edificio cuenta con una planta regular contando con 8 ejes en sentido longitudinal designados, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 con una distancia entre ellos de 7.20 m, 5.40 m, 5.40 m, 5.40 m, 5.40 m, 5.40 m, 5.40 m, 5.40 m, teniendo una longitud total de 39.60 m. En dirección transversal, se tienen dos ejes designados, A y B, con una distancia nominal de 10.80 m y con dos volados de 3.18 m respecto al eje A y 0.90 m respecto al eje B y una longitud transversal de 14.88 m. Al norte se encuentra la escalera de servicio compuesta de muros, trabes y rampas de concreto reforzado. (Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27), (Fernández, 2013). El edificio C tiene un peso total de 3,799.67 tonf (Fernández, 2013).

La Tabla 4.4 muestra la resistencia del concreto, acero de refuerzo y mampostería con las que fue construido el edificio.



Tabla 4.4. Propiedades de los materiales empleados en el edificio C

Propiedades por material	Valor
<b>Concreto:</b>	
Resistencia en Rampas, escaleras y columnas	$f'c = 350 \text{ kgf/cm}^2$
Módulo de elasticidad del concreto de $f'c = 350 \text{ kgf/cm}^2$	$Ec = 10,000\sqrt{350} = 187,083 \text{ kgf/cm}^2$
Resistencia en Muros, trabes y losas	$f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$
Módulo de elasticidad del concreto de $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$	$Ec = 10,000\sqrt{210} = 144,914 \text{ kgf/cm}^2$
Peso volumétrico	$2,400 \text{ kgf/cm}^3$
<b>Acero</b>	
Resistencia en Rampas, escaleras y columnas	$fy = 5,000 \text{ kgf/cm}^2$
Resistencia en Muros, trabes y losas	$fy = 5,000 \text{ kgf/cm}^2$
<b>Mampostería</b>	
Piedra Braza	
<b>Peso volumétrico</b>	$2.6 \text{ t/m}^3$
Módulo de Elasticidad	$295,261.96 \text{ kgf/cm}^2$
Ladrillo Hueco	
<b>Peso volumétrico</b>	$1.8 \text{ t/m}^3$
<b>Módulo de elasticidad</b>	$7,000 \text{ kgf/cm}^2$

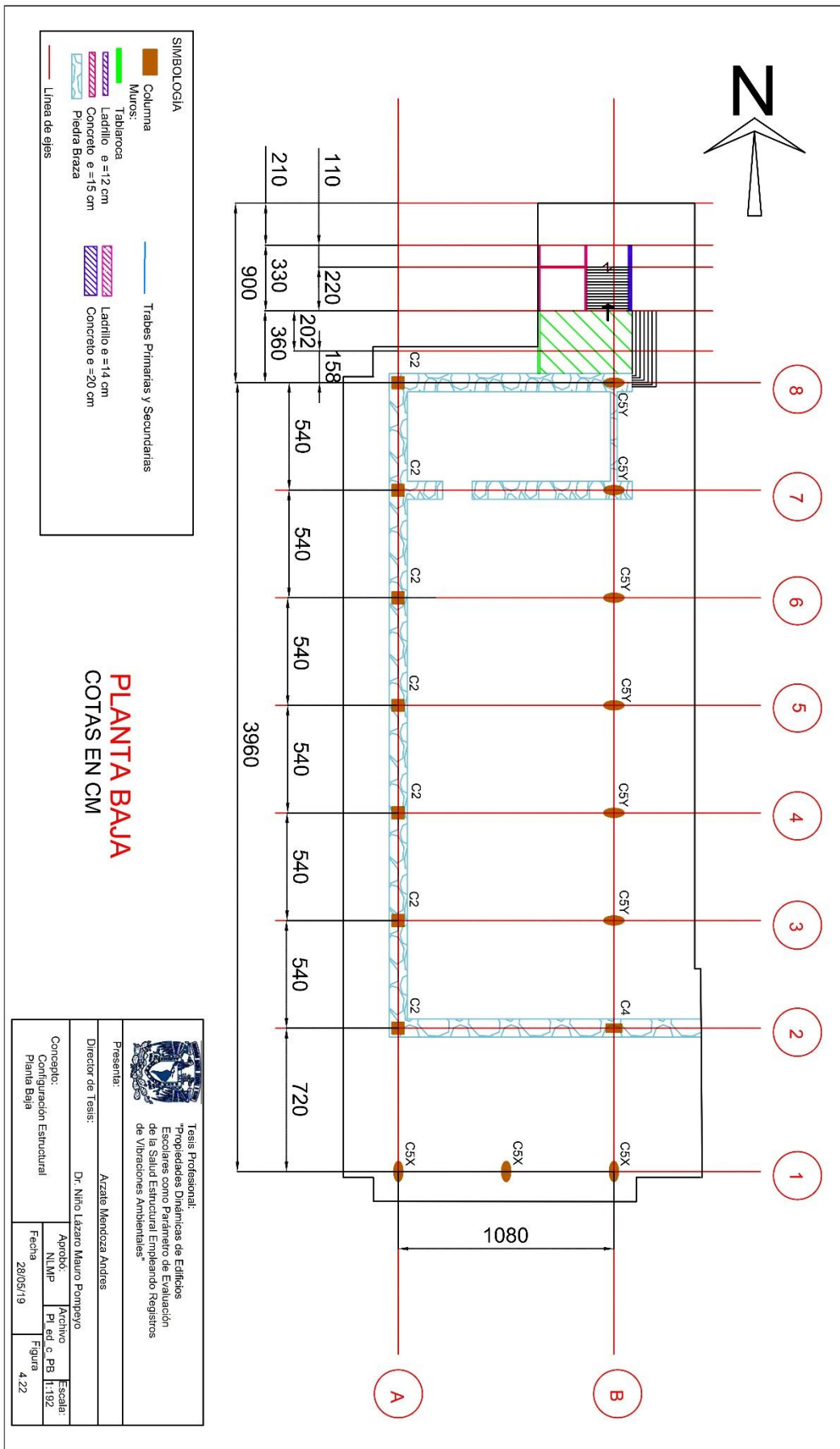


Figura 4.22 Planta estructural planta baja edificio C FI, UNAM

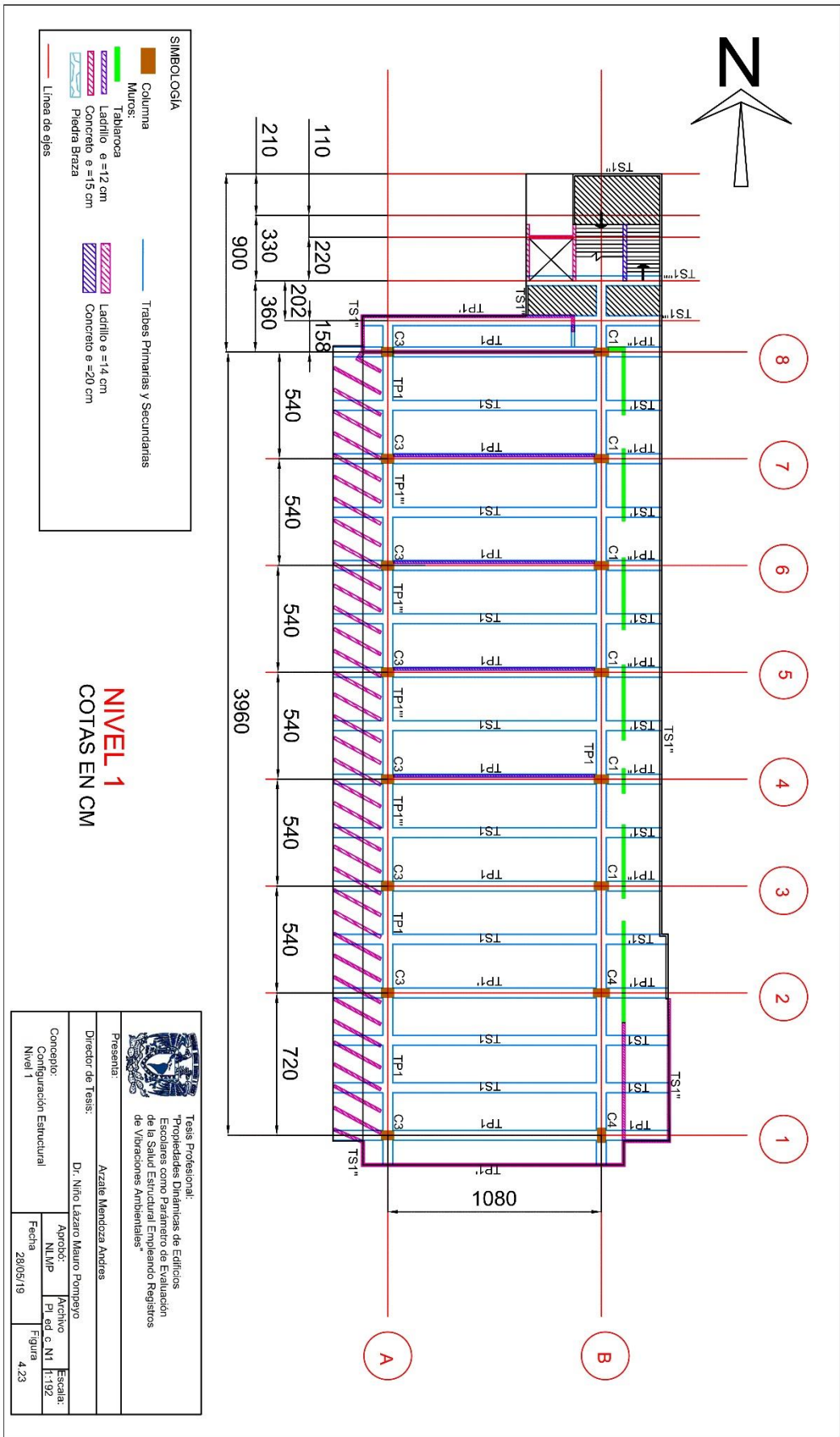


Figura 4.23 Planta estructural nivel 1 edificio C FI, UNAM

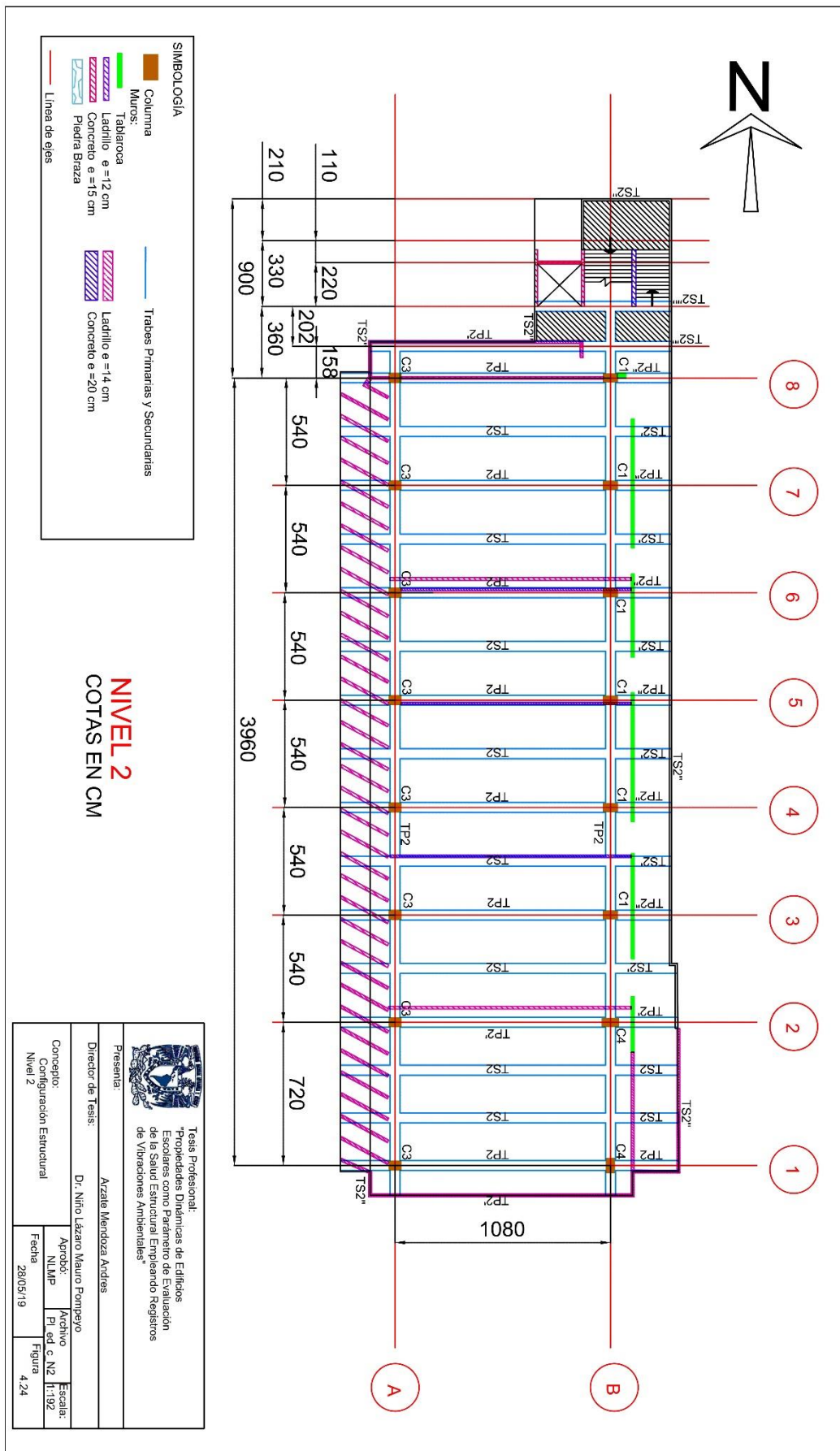


Figura 4.24 Planta estructural nivel 2 edificio C FI, UNAM

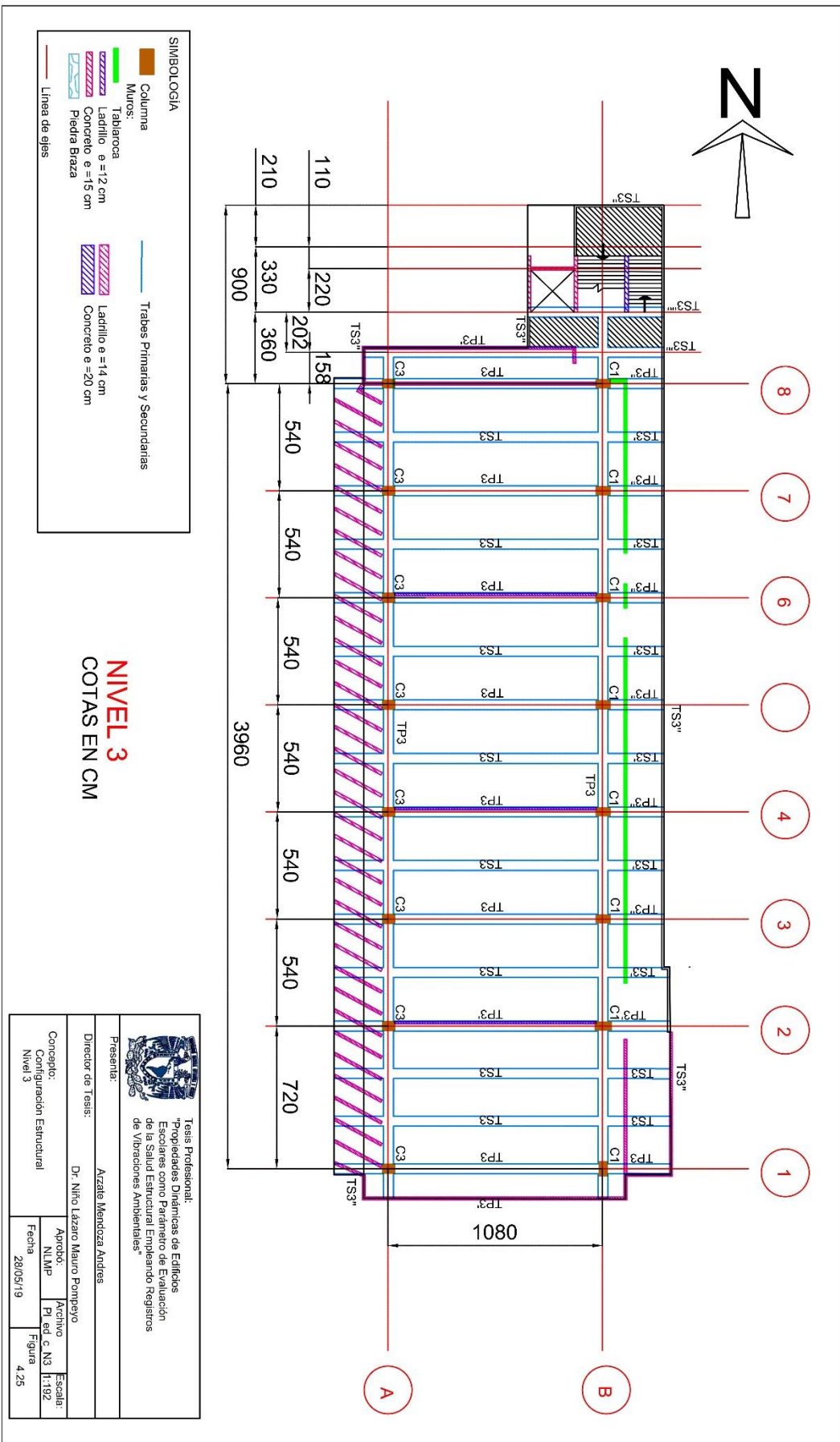


Figura 4.25 Planta estructural nivel 3 edificio C FI, UNAM

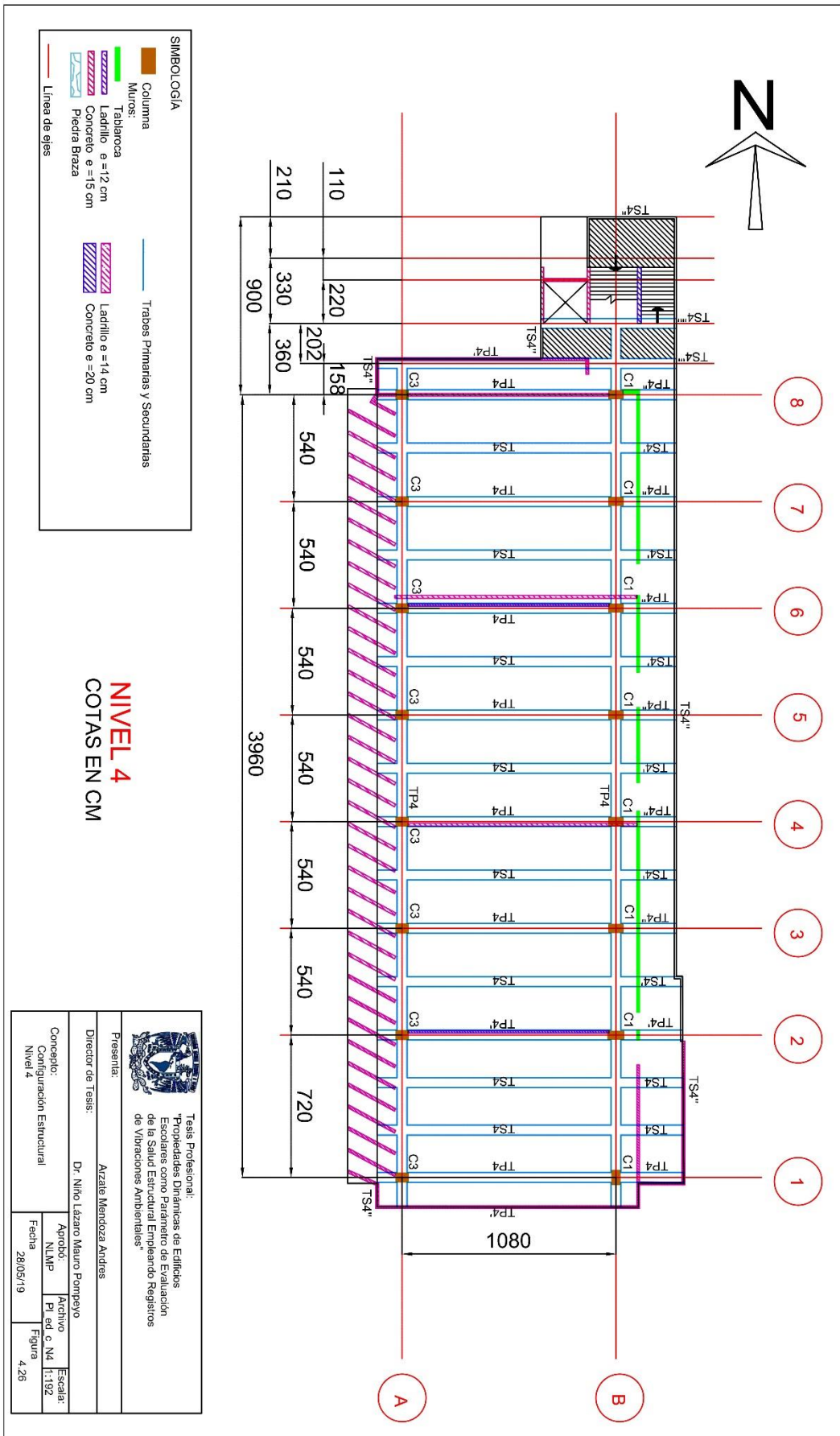


Figura 4.26 Planta estructural nivel 4 edificio C FI, UNAM

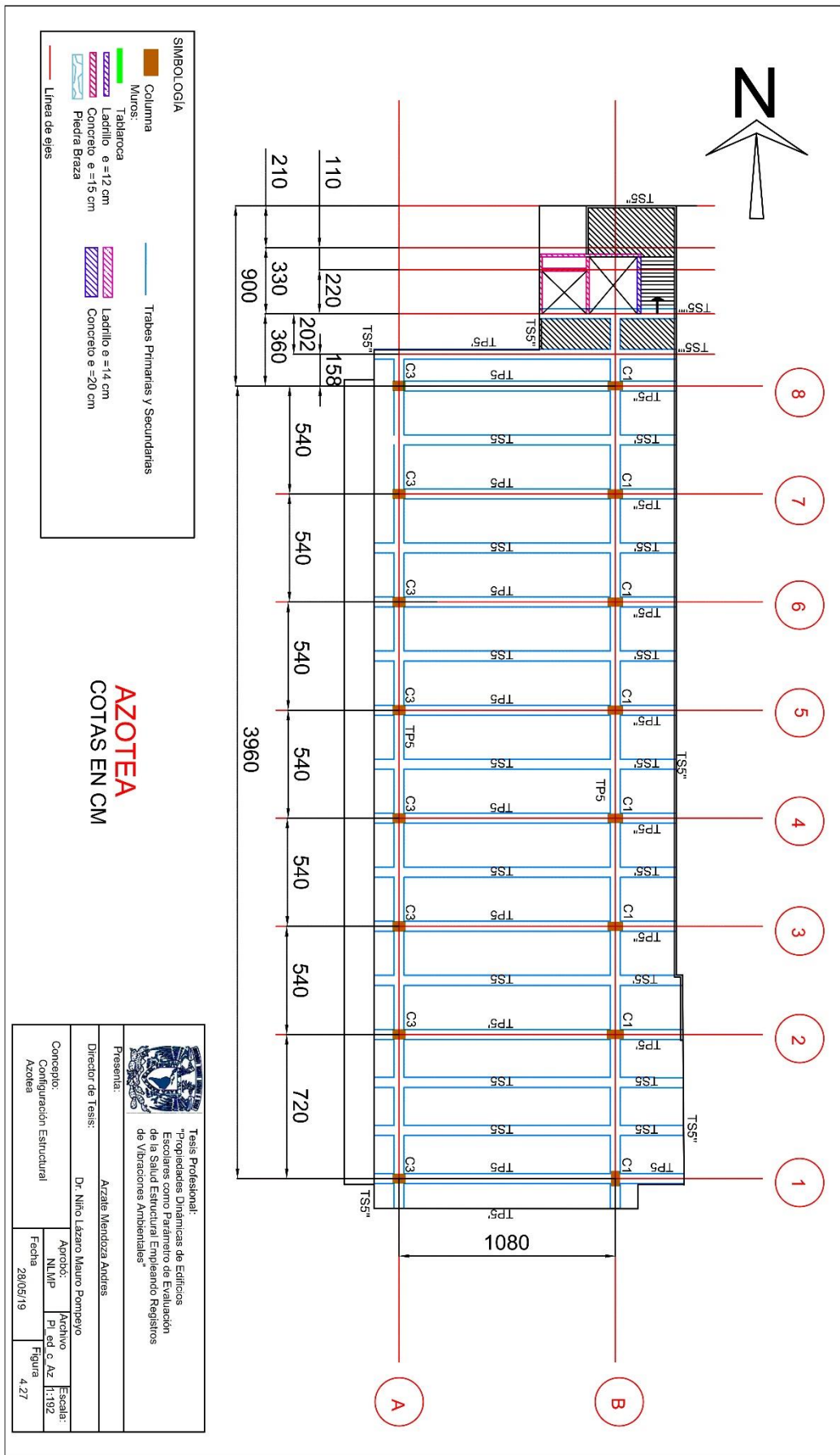


Figura 4.27 Planta estructural azotea edificio C FI, UNAM

## 4.2 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

### 4.2.1 EQUIPO EMPLEADO

Los equipos utilizados para la medición de vibraciones ambientales en los edificios B y C de la FI, UNAM son sismómetros triaxiales modelo GEOBOX de 2.0 Hz, de la marca SARA Electronic Instruments.

Estos equipos son unidades con sensores incrustados dentro del mismo, cada equipo está compuesto de aluminio, al ser instrumentos de precisión son muy susceptibles al movimiento por lo que vienen protegidos en un maletín especial donde se alojan sus diferentes componentes que se conectan a cada equipo como lo muestra la Figura 4.28.



Figura 4.28 Maletín del equipo GEOBOX con sus componentes.

En la Figura 4.28 se pueden observar componentes como un instrumento SR04 (1), pies ajustables (2), antenas GPS (3), un puerto pin-to-pin RS232 (4), una memoria USB (5), un USB-RS232 convertidor de datos (6), un cargador de batería (7) y un manual del usuario (8) que contiene el maletín de cada instrumento GEOBOX.

En la Figura 4.29 se observa el sismómetro y sus componentes enumeradas en la Tabla 4.5





Figura 4.29 Vista del sismómetro marca SARA y sus componentes

Tabla 4.5 Componentes del sismómetro.

Componente	
1 Equipo	5 Cargador de batería
2 Mira del Nivel	6 Conexión antena GPS
3 Salida de conexión de datos	7 Pies niveladores
4. Salida de GPS	

#### 4.2.2 CONFIGURACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LOS EQUIPOS EN EL EDIFICIO B Y C FI, UNAM.

Con el fin de hacer la recopilación de información en el edificio B y C de la FI, UNAM, se estudió cada plano de las estructuras para determinar dónde colocar los equipos. A continuación, se muestran los planos del lugar dónde se colocó cada equipo.

La estación 1 en las figuras 4.30 y 4.31 no se muestran, ya que ésta se ubicó en el suelo del edificio con el fin de obtener valores del comportamiento del suelo donde se ubica cada estructura.

La posición de los sismómetros en el edificio B de la FI, UNAM está representado en las Figura 4.30 a) y b) correspondientes al Nivel 2 y 4 respectivamente en la estructura.

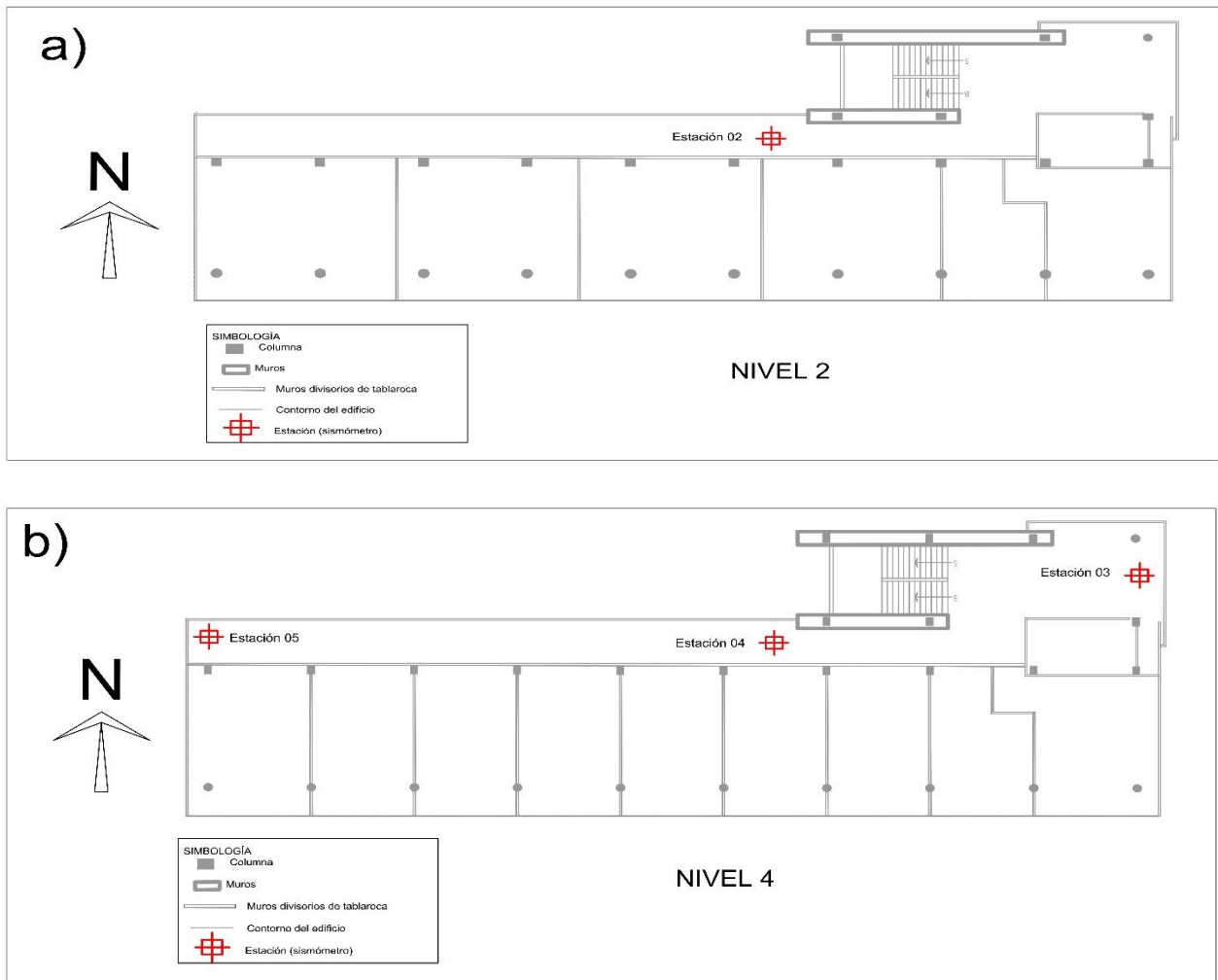


Figura 4.30 Vista de la colocación de sismómetros en el edificio B: a) colocación de equipo 2 en nivel 2 b) colocación de equipo 3, 4 y 5 en el nivel 4

La posición de los sismómetros en el edificio C de la FI, UNAM está representado por las Figuras 4.31 a) y b) correspondientes al Nivel 2 y 4 respectivamente en la estructura.

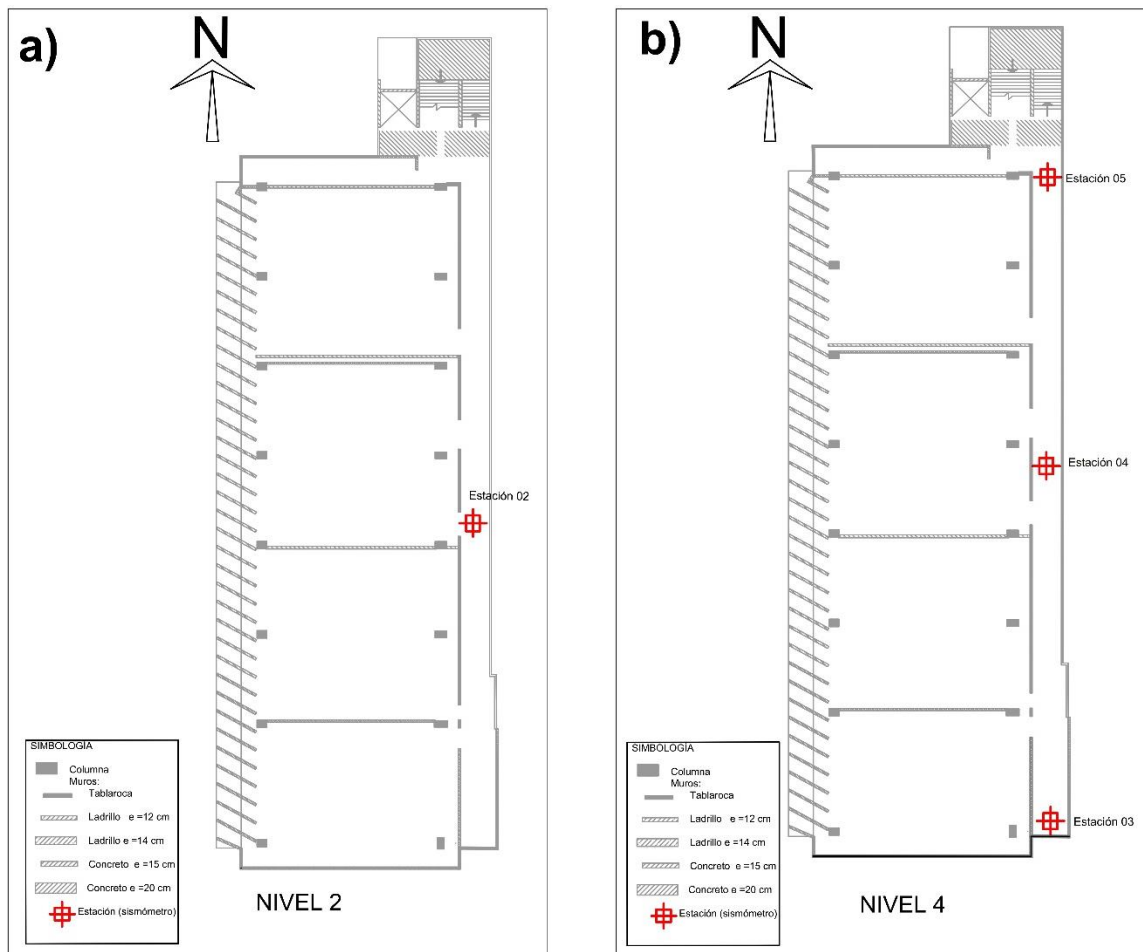


Figura 4.31 Vista de la colocación de sismómetros en el edificio C, a) colocación de equipo 2 en el Nivel 2 b) colocación de equipos 3, 4 y 5 en el nivel 4

Como se observa en las figuras anteriores (Figura 4.30 y 4.31), la mayoría de los equipos se encuentran ubicados en el nivel 4, en ambos edificios, esto debido a que en el último nivel se espera que se presente el mayor movimiento, obteniendo entonces mejores valores captados por los equipos.

### 4.2.3 REGISTROS

Cada registro se obtuvo mediante los sismómetros antes mencionados. Todos los registros obtenidos tuvieron una duración de 10 minutos para poder tener un buen número de datos certeros ante la posible presencia de ruido y poder garantizar que se incluyan los valores típicos de vibración que se pretendan evaluar en el sitio y un valor de 60,000 datos (100 por cada segundo) en una unidad de velocidad llamada cuentas/segundos, posteriormente se convirtieron a metros/segundo para su análisis, la Figura 4.32 muestra los registros obtenidos en la medición de vibraciones ambiente en los edificios B y C de la FI, UNAM con terminación .SAF. Cada registro obtenido contiene datos de frecuencia de muestreo, día y hora de registro, equipo utilizado, unidad de muestreo, dirección de registro (vertical, norte-sur, este-oeste) y las coordenadas geográficas del sitio (altitud, longitud y elevación). Posteriormente se visualiza una línea discontinua y a continuación se comienzan a desplegar los datos obtenidos en tres columnas, cada columna por cada dirección de registro.

```
¡ESAME ASCII data format (saf) v. 1 (this line must not be modified)
SAMP_FREQ = 100
NDAT = 0000060000
START_TIME = 2019 02 23 16 21 00.000
CLIPPING_SAMPLES = 0000000000 0000000000 0000000000
SENSOR_TYPE = Velocity
RESPFILE =
# The above response file is correlated only to the Z-channel
# The response file for the NS-channel is the following:
#
# The response file for the EW-channel is the following:
#
ACQ_SYSTEM = SARA SR04HS (Geobox)
# SURVEY_NAME = Edif-B
STA_CODE = ESTR-01
STA_COORD_TYPE = 0
NORTH_ROT = 0
UNITS = Counts
CH0_ID = V
CH1_ID = N
CH2_ID = E
STA_X = 099.18478W
STA_Y = 19.33131N
STA_Z = 0
#####-----
-402 -2385 -6070
1976 -270 -1417
2835 2551 4273
2815 4488 5675
2910 4330 2520
3315 1984 -1136
3806 -1801 -1693
3742 -4015 1071
2337 -3572 3768
-577 -1803 4721
-3473 366 4099
```

Figura 4.32. Vista del formato de entrega de los archivos .SAF

La Figura 4.33 es una visualización de un registro obtenido en el edificio B de la FI, UNAM, donde es posible ver las mediciones hechas en sus tres direcciones de estudio: norte-sur, este-oeste y vertical.

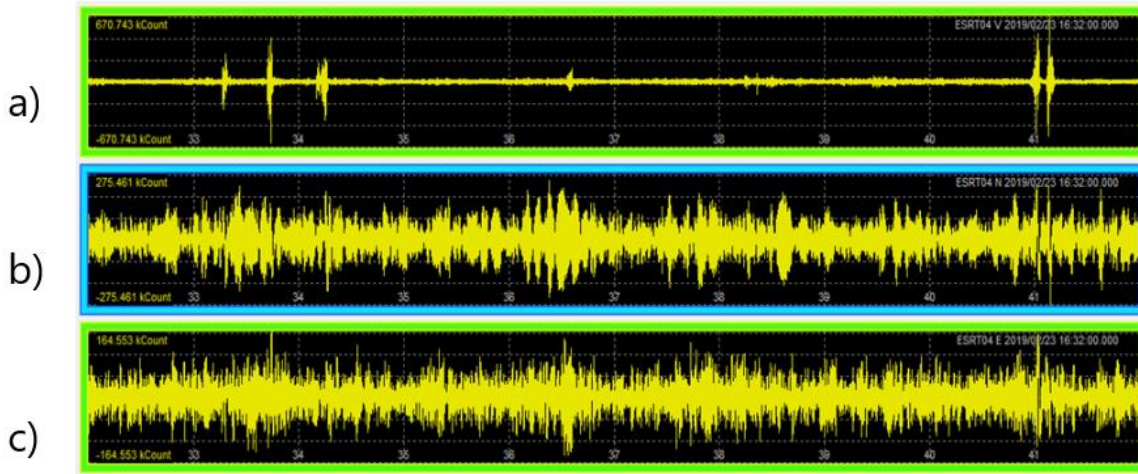


Figura 4.33 Registros obtenidos del edificio B de vibraciones ambientales en sus tres direcciones de estudio: a) vertical, b) norte-sur y c) este-oeste, respectivamente.

La Figura 4.34 es una visualización de un registro obtenido en el edificio C de la FI, UNAM donde es posible ver las mediciones hechas en sus tres direcciones de estudio: norte-sur, este-oeste y vertical.

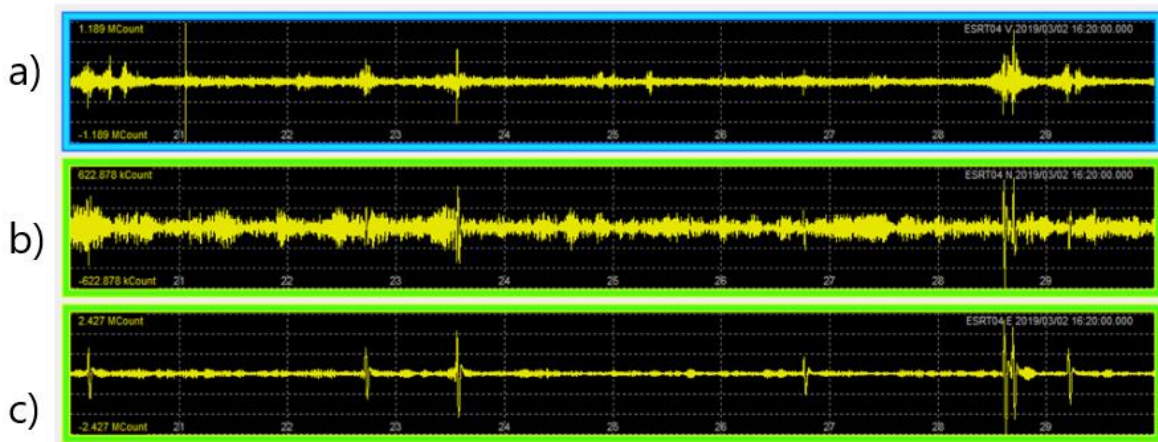


Figura 4.34 Registros obtenidos del edificio C de vibraciones ambientales en sus tres direcciones de estudio: a) vertical, b) norte-sur y c) este-oeste, respectivamente.

### 4.3 MODELACIÓN ESTRUCTURAL

Para el edificio B y C de la FI, UNAM, se realizó un modelado utilizando el programa SAP2000 (CSI, 2018) para complementar y realizar una comparación de los valores arrojados en los análisis presentes en el capítulo 5 sobre los periodos y propiedades nominales obtenidos por el programa SAP2000 (CSI, 2018) y los obtenidos por los registros sísmicos de vibraciones ambientales.

Para realizar el modelado se utilizó la información presentada en la sección 4.1 y las diferentes cargas vivas instantáneas según el reglamento vigente en la construcción de las estructuras; para el edificio B el reglamento de 1942 (DDF, 1942) y para el edificio C el reglamento de 1966 (DDF, 1966) que se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Cargas Vivas Instantáneas

Edificio	Carga viva (kgf/m <sup>2</sup> )	
	Pisos intermedios	Azotea
<b>B</b>	200	100
<b>C</b>	110	40

#### Modelación edificio B

Las Figuras 4.35 y 4.36 muestran el modelado del edificio B en el programa SAP2000 (CSI, 2018), contemplando las diferentes especificaciones estructurales de la sección o subcapítulo 4.1.

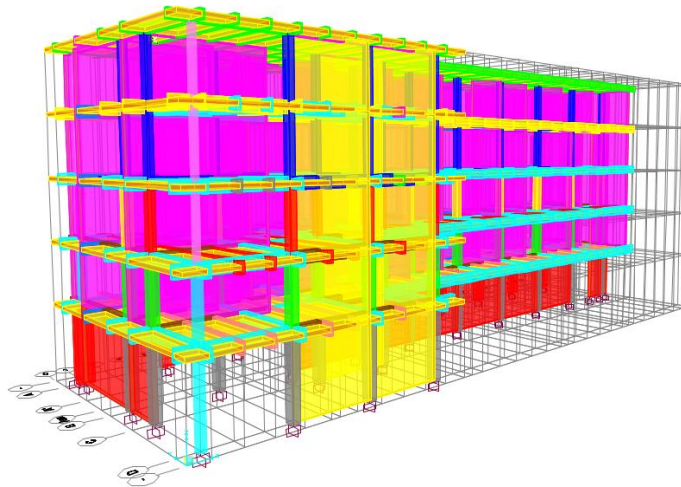
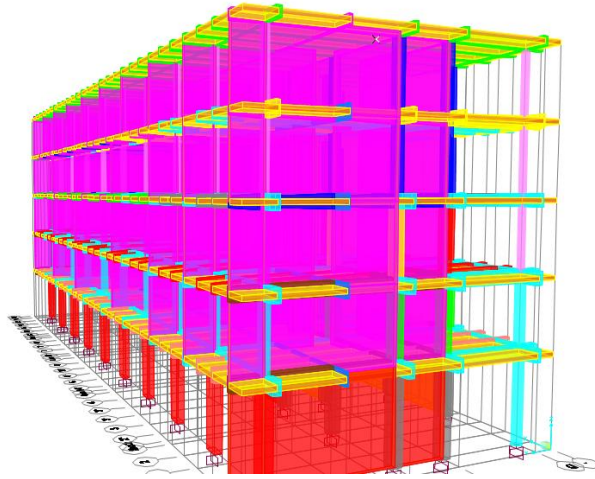


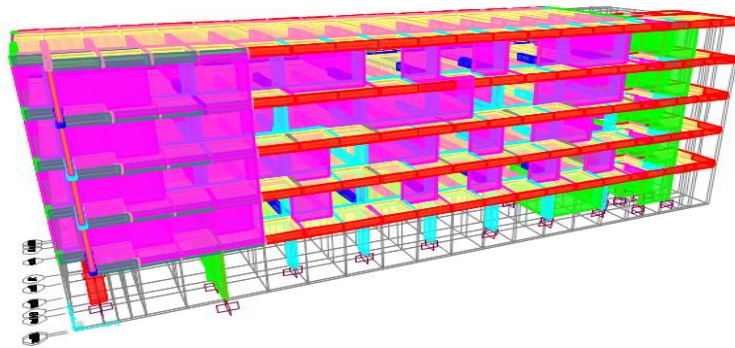
Figura 4.35 Vista trasera del modelo del edificio B



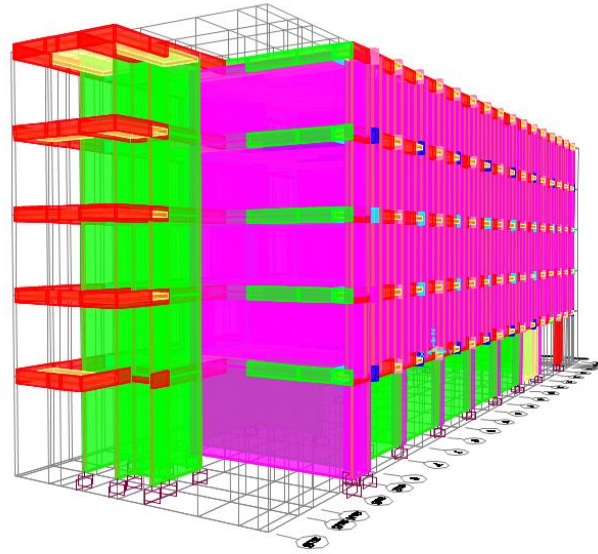
*Figura 4.36 Vista delantera del modelo del edificio B FI, UNAM*

### **Modelación edificio C**

Las Figuras 4.37 y 4.38 muestran el modelado del edificio C en el programa SAP2000 (CSI, 2018) las diferentes especificaciones estructurales de la sección 4.1.



*Figura 4.37 Vista trasera del modelo del edificio C FI, UNAM*



*Figura 4.38 Vista delantera del modelo del edificio C FI, UNAM*

A continuación, se muestran los datos obtenidos del análisis y la implementación del modelado hecho en SAP2000 (CSI,2018) de los edificios B y C de la FI, UNAM.



## **5 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del estudio y análisis de las estructuras de los edificios B y C pertenecientes a la FI, UNAM, donde se obtuvo de cada edificio 5 mediciones de 10 minutos, con 60,000 valores en unidades de velocidad en cuentas/segundo por cada uno de los 5 sismómetros con los que se contó, los cuales se colocaron respecto a los planos presentes en el subcapítulo 4.2.

De cada medición de vibración ambiental hecha, fue necesario obtener 3 archivos en formato de texto (.txt) con el fin de poder separar las direcciones de medición norte-sur, este-oeste y vertical que se obtienen de cada sismómetro.

Al obtener los archivos de texto correspondientes de cada equipo, se realizó un análisis mediante el uso del método espectral con la ayuda de la herramienta virtual LabVIEW (NI, 2018) para obtener cada uno de los espectros asociados a la metodología considerada, para poder obtener los resultados como se muestra a continuación.

### **5.1 PERIODO DE VIBRAR DEL SUELO**

Conocer las condiciones del suelo en el que están las estructuras construidas es un dato importante al momento de realizar cualquier estudio estructural; aún más importante al realizar una revisión estructural mediante la obtención de registros sísmicos por el método de vibraciones ambientales.

La importancia de obtener el período de vibrar del suelo radica al momento de obtener los periodos estructurales mediante el uso de la FFT, ya que se puede presentar cierta influencia del suelo sobre la estructura lo que de cierta manera puede identificarse como ruido.

Para obtener el periodo de vibrar del suelo en cada estructura se colocó la Estación 1 en el suelo cercano a la estructural.

A los registros obtenidos del suelo se les aplicó la FFT para obtener los valores asociados de periodos.

Al implementar la FFT a cada uno de los valores obtenidos se obtuvo el promedio de las 5 mediciones hechas y se graficaron como se muestra en la figura 5.1 y 5.2

donde se puede visualizar las curvas de la FFT captadas para el edificio B y C de la FI, UNAM.

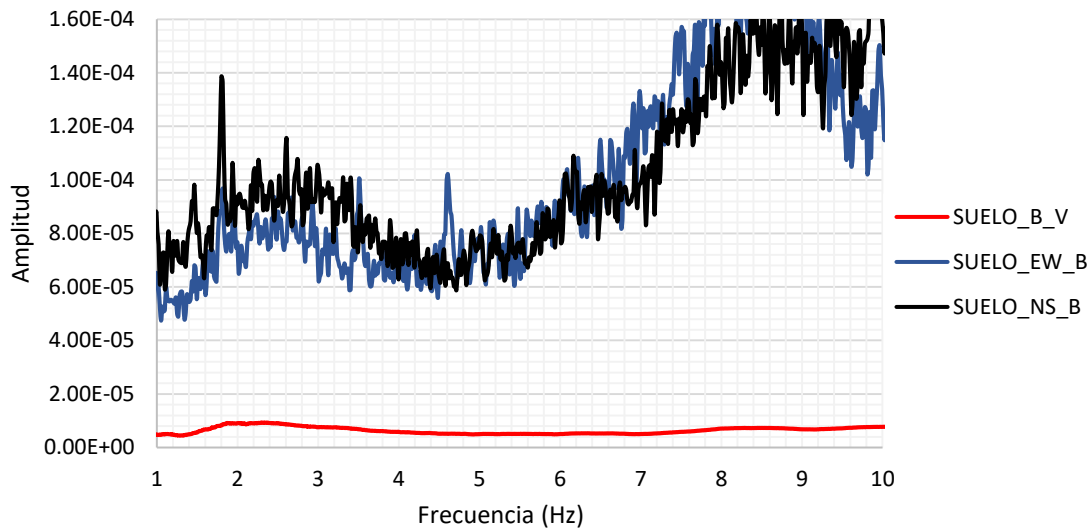


Figura 5.1 FFT del suelo cercano al edificio B de la FI, UNAM, donde se muestran 3 curvas obtenidas de la estación 1 colocada en el suelo en dirección vertical (V), norte-sur (NS) y este-oeste (EW)

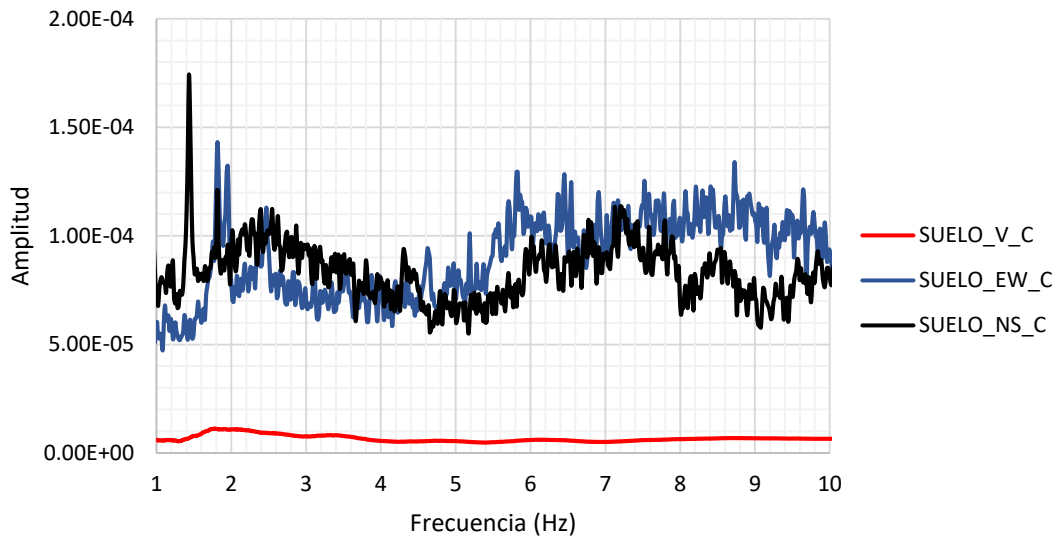


Figura 5.2 FFT del suelo cercano al edificio C de la FI, UNAM, donde se muestra 3 curvas obtenidas de la estación 1 colocada en el suelo en dirección vertical (V), norte-sur (NS) y este-oeste (EW)

Las Figuras 5.1 y 5.2 de las gráficas obtenidas del análisis de las señales del suelo a través de la FFT se puede visualizar en primera medida un ruido presente al mostrar muchos picos de similar amplitud, por lo que se optó sacar el promedio de los valores para las direcciones norte-sur y este-oeste entre el edificio B y el C con los valores con los que se construyeron las Figuras 5.1 y 5.2.

La Figura 5.3 muestra el promedio de los valores de FFT de los edificios B y C para poder obtener un valor promedio del período del suelo.

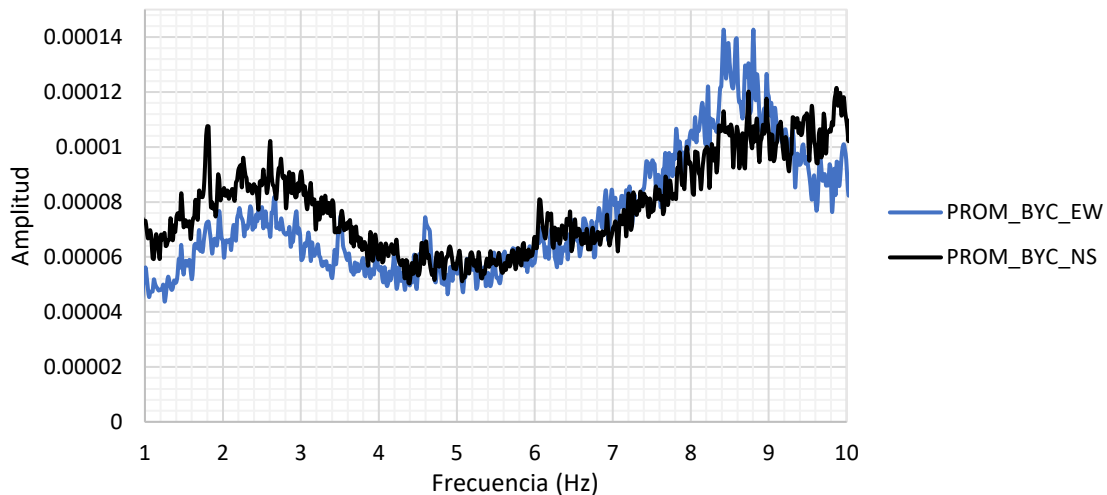


Figura 5.3 Gráfica de los promedios obtenidos de las gráficas de FFT de los edificios B y C mostrando las direcciones norte-sur y este-oeste

El valor promedio obtenido de periodo asociado al suelo presente donde está desplantada cada estructura es de 0.38 segundos.

## 5.2 PERIODOS ESTRUCTURALES DE VIBRAR

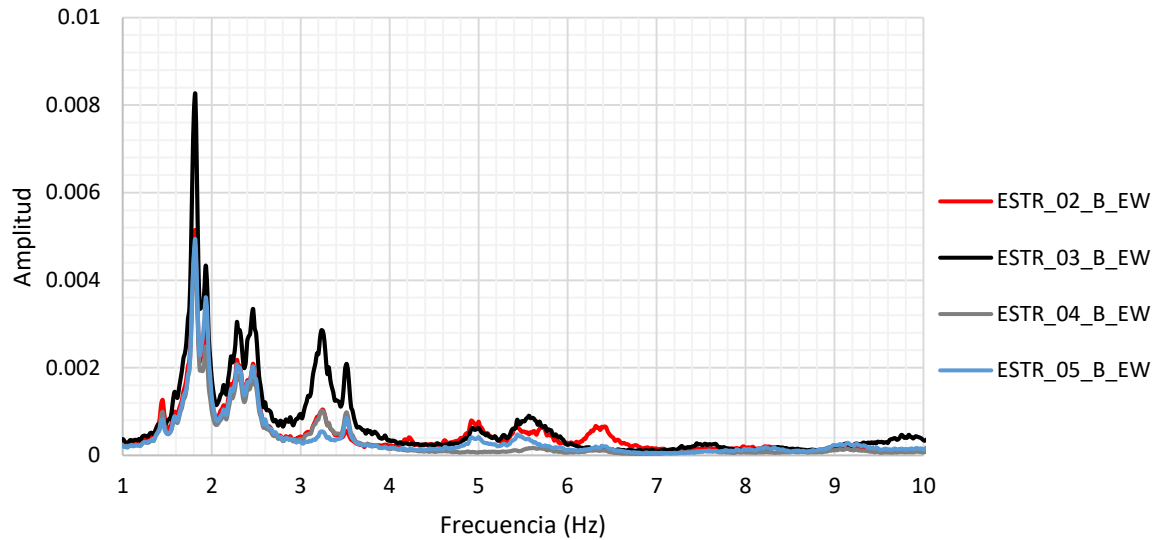
Los sismómetros correspondientes a las Estaciones 2 a 5 se colocaron de acuerdo a los planos presentes en el subcapítulo 4.2.

A cada archivo obtenido se le realizó un procesamiento mediante el método espectral, el cual consiste en obtener la transformada rápida de Fourier (FFT), espectros de potencia, espectros de fase y espectros de coherencia.

### 5.2.1 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

A cada señal obtenida se le aplicó la FFT para poder encontrar los picos que se generan y sus respectivas frecuencias, esto con el fin de obtener los periodos asociados a las estructuras en estudio.

Las Figuras 5.4 y 5.5 muestran las gráficas de los valores promediados obtenidos al aplicar la FFT a cada señal obtenida de todas las lecturas hechas de las estaciones 2 a 5 en dirección este-oeste y norte-sur en el edificio B de la FI, UNAM.



*Figura 5.4 Valores promediados de FFT de las estaciones 2 a 5 en dirección este-oeste edificio B FI, UNAM*

La figura 5.4 tiene unas leyendas donde se expresa de la siguiente manera “ESTR\_02\_B\_EW”, donde “ESTR” hace relación a los sismómetros utilizados a los cuales se les nombro como estaciones, el “02” hace referencia al sismómetro número 2 utilizado, la letra “B”, hace referencia al edificio donde se obtuvo la medición y las letras “EW” la dirección de análisis ya sea EW para este-oeste o NS para norte-sur; este tipo de leyenda aplica para las imágenes que a continuación aparecen.

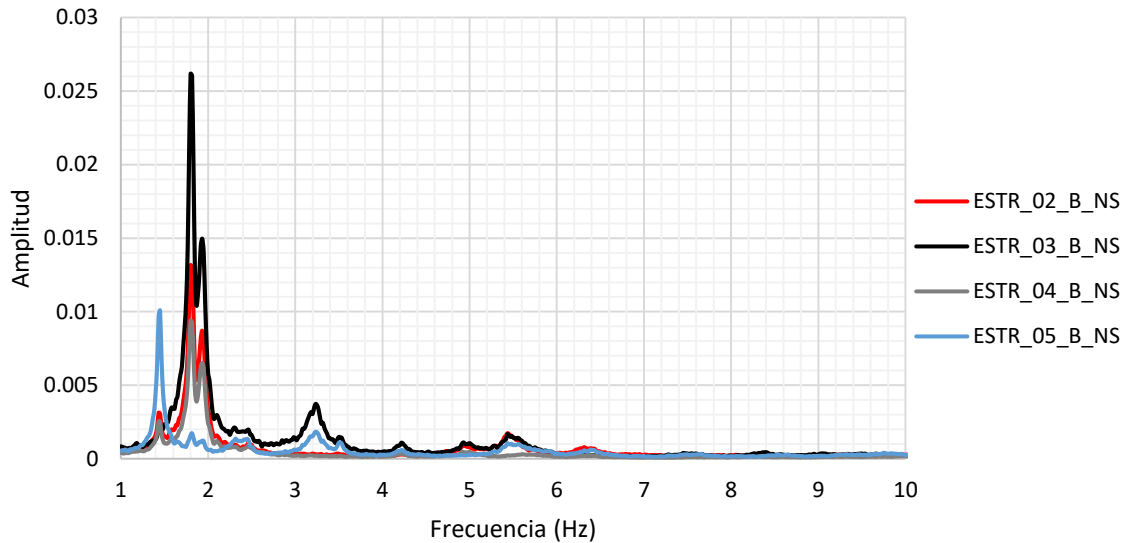


Figura 5.5 Valores promediados de FFT de las estaciones 2 a 5 en dirección norte-sur edificio B

En la tabla 5.1 se muestran los valores de frecuencias con sus respectivos periodos hechas en la lectura de los picos presentes en las graficas de la FFT de las Figuras 5.4 y 5.5 del edificio B de la FI, UNAM asociados a las direcciones de estudio norte-sur y este-oeste.

Tabla 5.1 Frecuencias y periodos del edificio B FI, UNAM

Valores de frecuencias estructurales (Hz)		Valores de periodos estructurales (s)	
Norte-Sur	Este-Oeste	Norte-Sur	Este-Oeste
1.82	1.82	0.55	0.55
1.93	1.93	0.52	0.52
2.30	3.25	0.43	0.31
2.47	4.23	0.41	0.24
3.25	5.00	0.31	0.20
3.53	5.45	0.28	0.18
5.02	-	0.20	-

Las Figuras 5.6 y 5.7 muestran las gráficas de los valores promediados obtenidos al aplicar la FFT a cada señal obtenida de todas las lecturas hechas de las estaciones 2 a 5 en el edificio C de la FI, UNAM.

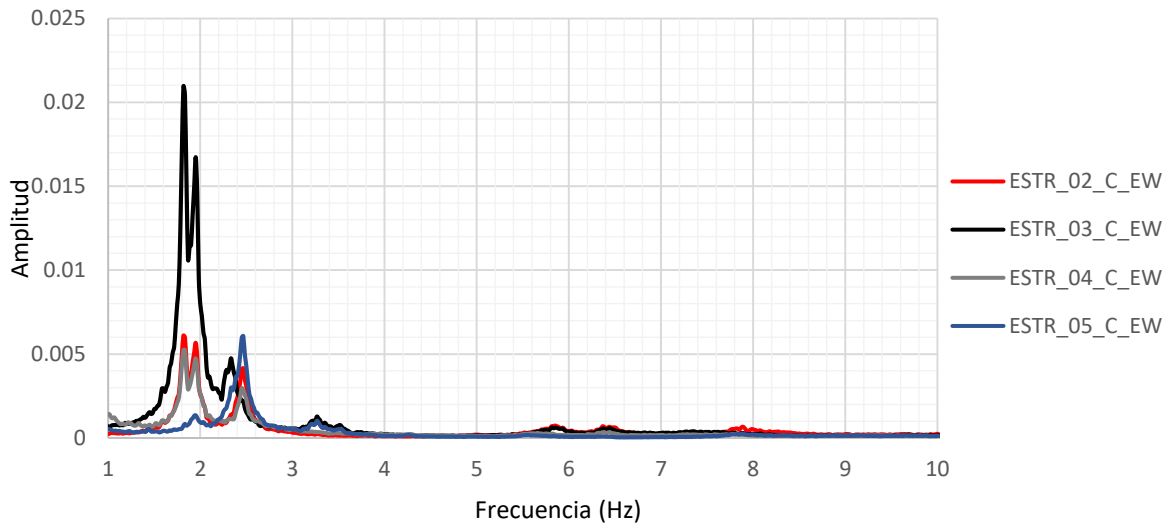


Figura 5.6 Valores promediados de FFT de las estaciones 2 al 5 en dirección este-oeste edificio C FI, UNAM

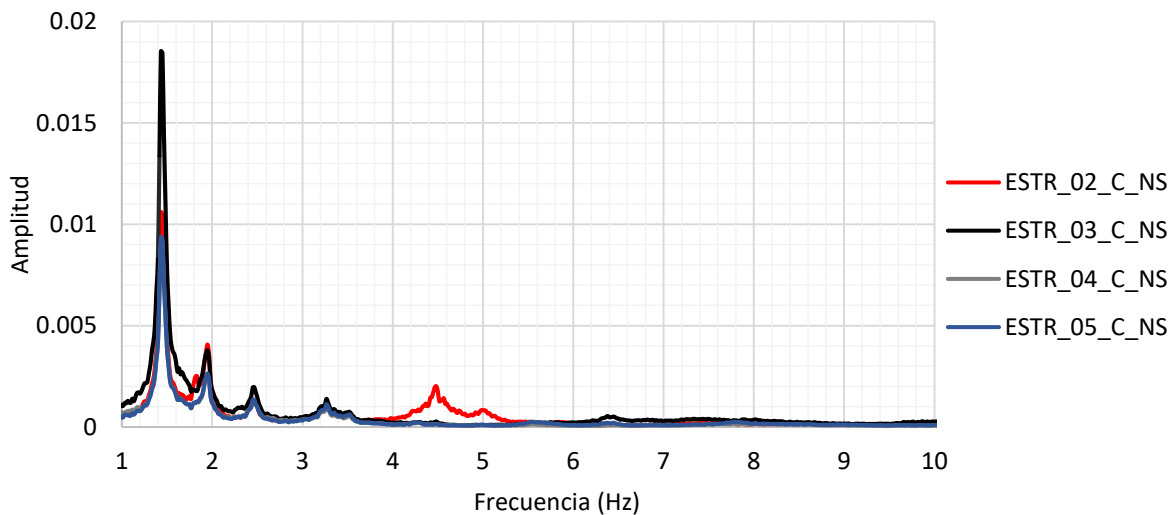


Figura 5.7 Valores promediados de FFT de las estaciones 2 al 5 en dirección norte-sur edificio C

En la tabla 5.2 se muestran los valores de frecuencias con sus respectivos periodos hechas en la lectura de los picos presentes en las gráficas de la FFT de las Figuras 5.6 y 5.7 del edificio C de la FI, UNAM asociados a las direcciones de estudio norte-sur y este-oeste.

Tabla 5.2 Periodos del edificio C FI, UNAM

Frecuencias estructurales (Hz)		Periodos estructurales (s)	
Norte-Sur	Este-Oeste	Norte-Sur	Este-Oeste
1.45	1.83	0.69	0.55
1.95	1.95	0.51	0.51
2.47	2.47	0.41	0.41
3.27	3.28	0.31	0.30
4.50	5.87	0.22	0.17
5.03	6.50	0.20	0.15
6.43	7.93	0.16	0.13
7.86	-	0.13	-
7.98	-	0.13	-

## 5.2.2 ESPECTROS DE POTENCIA

Como parte del análisis hecho para la determinación de los periodos estructurales se obtuvieron los espectros de potencia de cada edificio analizado para corroborar que dichos periodos pertenecen a las estructuras en cuestión.

Las Figuras 5.8 y 5.9 muestran las gráficas de los valores promediados de los espectros de potencia obtenidos en las direcciones este-oeste y norte-sur respectivamente de las estaciones 2 a 5 y las respectivas frecuencias obtenidas en el análisis con la FFT identificadas por medio de líneas verticales obtenidos en el edificio B de la FI, UNAM.

La Figura 5.8 presenta una leyenda donde se expresa de la siguiente manera “ESTR\_02\_B\_EW”, donde “ESTR” hace relación a los sismómetros utilizados a los cuales se les nombró como estaciones, el “02” hace referencia al sismómetro número 2 utilizado, la letra “B”, hace referencia al edificio donde se obtuvo la medición y las letras “EW” la dirección de análisis ya sea EW para este-oeste, o NS para norte-sur, además de la presencia de unas líneas verticales que son las frecuencias encontradas mediante FFT; este tipo de leyenda aplica para las imágenes que a continuación aparecen.

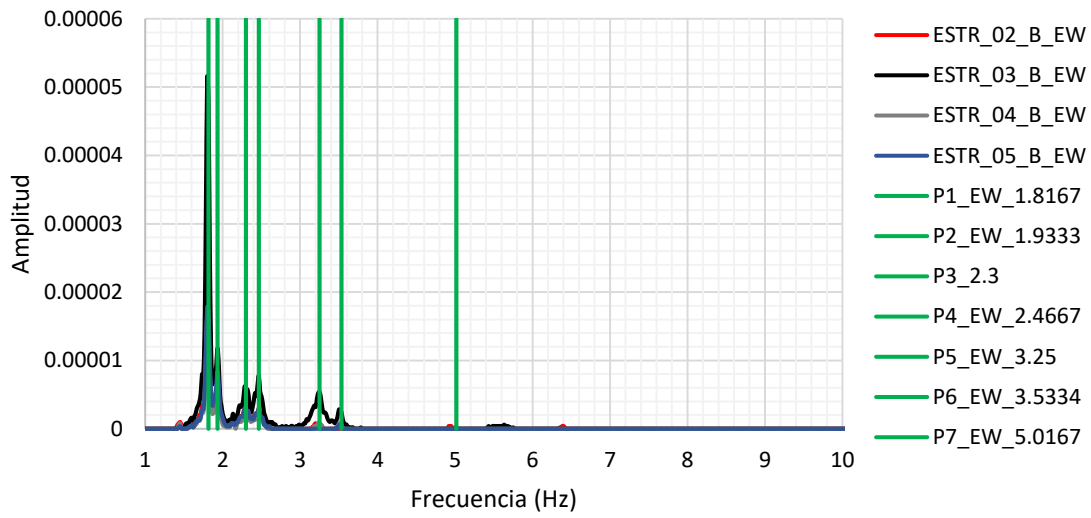


Figura 5.8 Espectros de potencia del edificio B FI, UNAM en dirección este-oeste

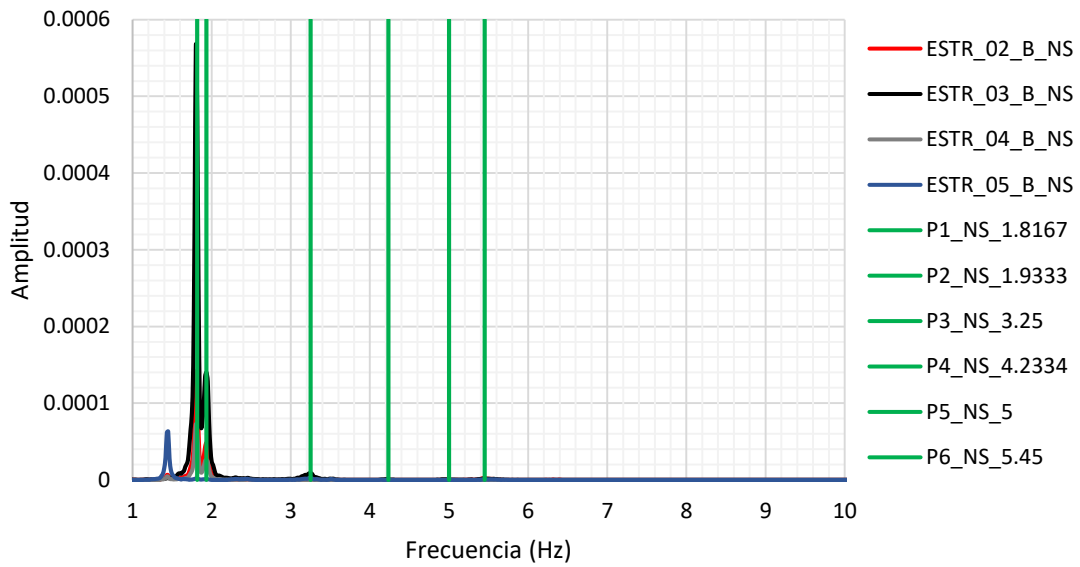


Figura 5.9 Espectros de potencia del edificio B FI, UNAM en dirección norte-sur



Las Figuras 5.10 y 5.11 muestran las gráficas de los valores promediados de los espectros de potencia obtenidos en dirección norte-sur de las estaciones 2 al 5 y las respectivas frecuencias obtenidas en el análisis con la FFT identificadas por medio de líneas verticales de color negro obtenidos en el edificio C de la FI, UNAM.

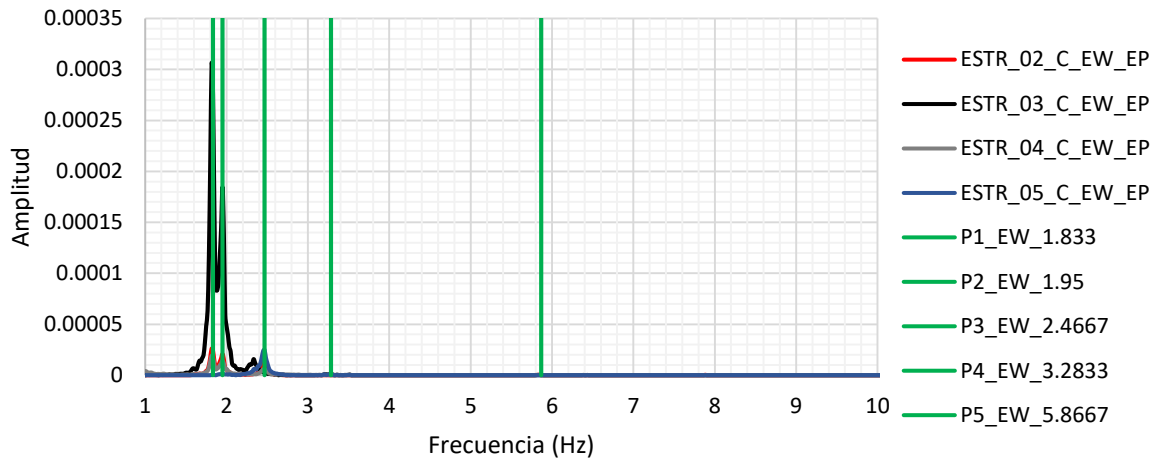


Figura 5.10 Espectros de potencia del edificio C FI, UNAM en dirección este-oeste

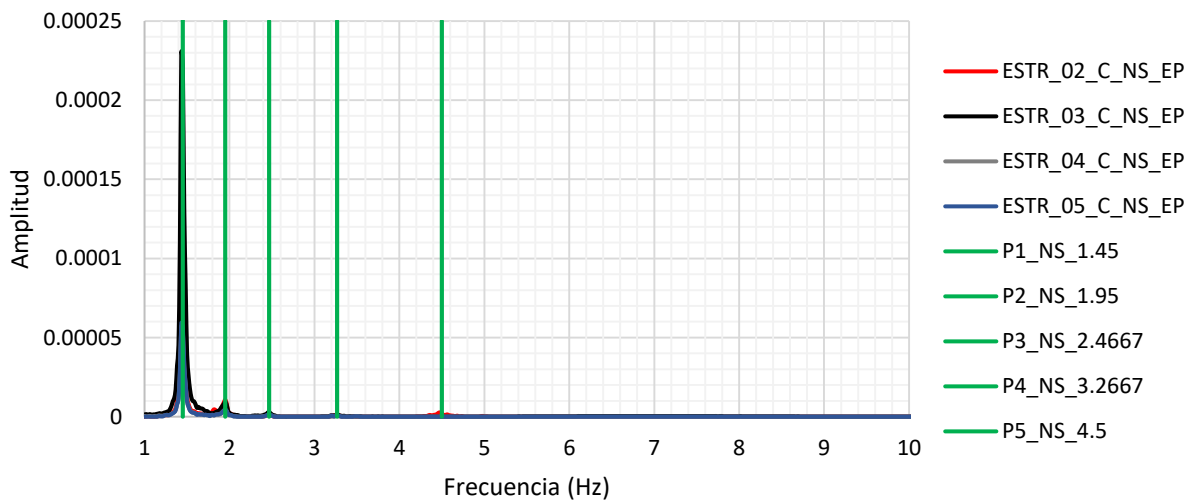
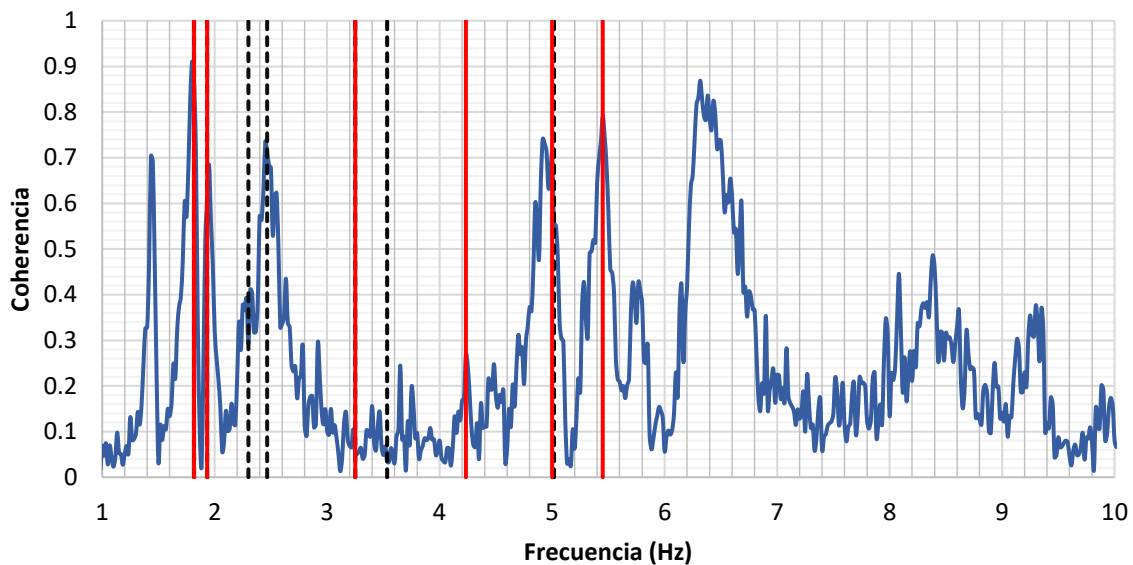


Figura 5.11 Espectros de potencia del edificio C FI, UNAM en dirección norte-sur

### 5.2.3 ESPECTROS DE COHERENCIA

Para continuar con el análisis por método espectral es necesario conocer que tan segura y confiable es la señal que se está utilizando para evitar lecturas erróneas que presenten alto contenido de ruido.

Las Figuras 5.12 a 5.15 son gráficas de los espectros de coherencia obtenidos de las estaciones 2 a 5 respecto a la estación ubicada en campo libre correspondientes al edificio B de la FI, UNAM, donde se muestran con líneas verticales una continua y otra discontinua los datos de frecuencias obtenidas del análisis de la FFT en las direcciones norte-sur y este-oeste respectivamente.



*Figura 5.12 Espectro de coherencia de la estación 2, sismómetro colocado en el nivel 2 del edificio C FI, UNAM*

La Figura 5.12 presenta dos tipos de líneas verticales las cuales corresponden a las frecuencias obtenidas de la FFT las líneas continuas representan frecuencias en la dirección de análisis este-oeste, mientras que las líneas discontinuas representan frecuencias en la dirección de análisis norte-sur, lo cual se aplica para las figuras que se muestran a continuación.

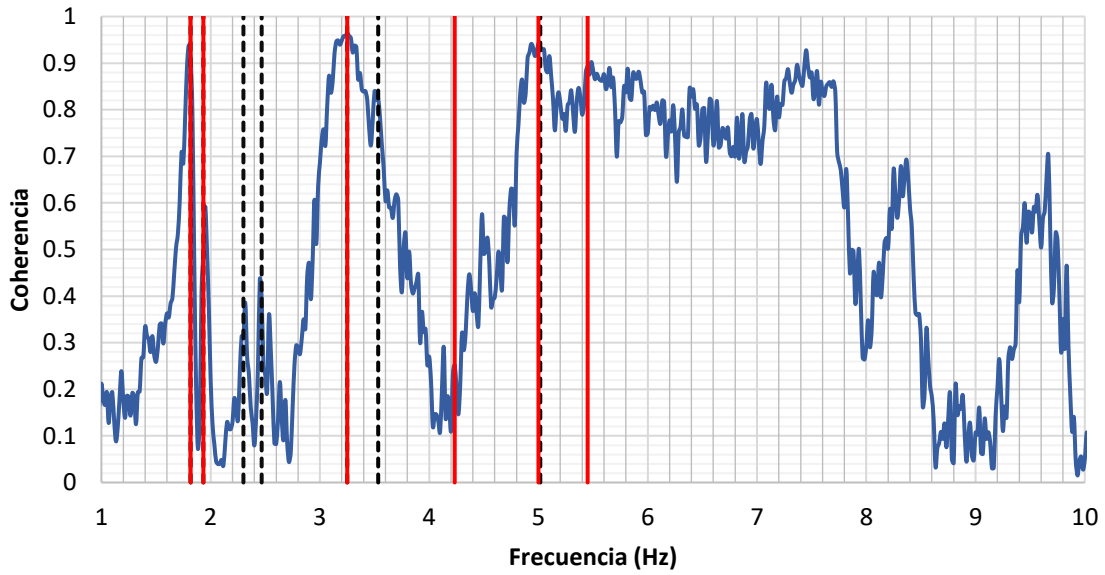


Figura 5.13 Espectro de coherencia de la estación 3, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio B FI, UNAM

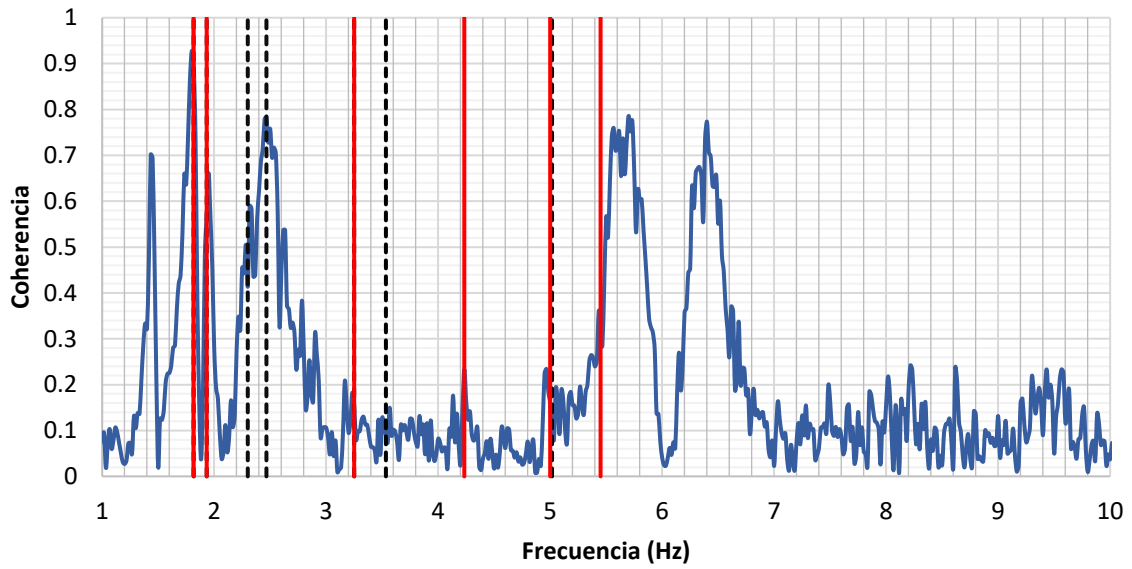


Figura 5.14 Espectro de coherencia de la estación 4, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio B FI, UNAM

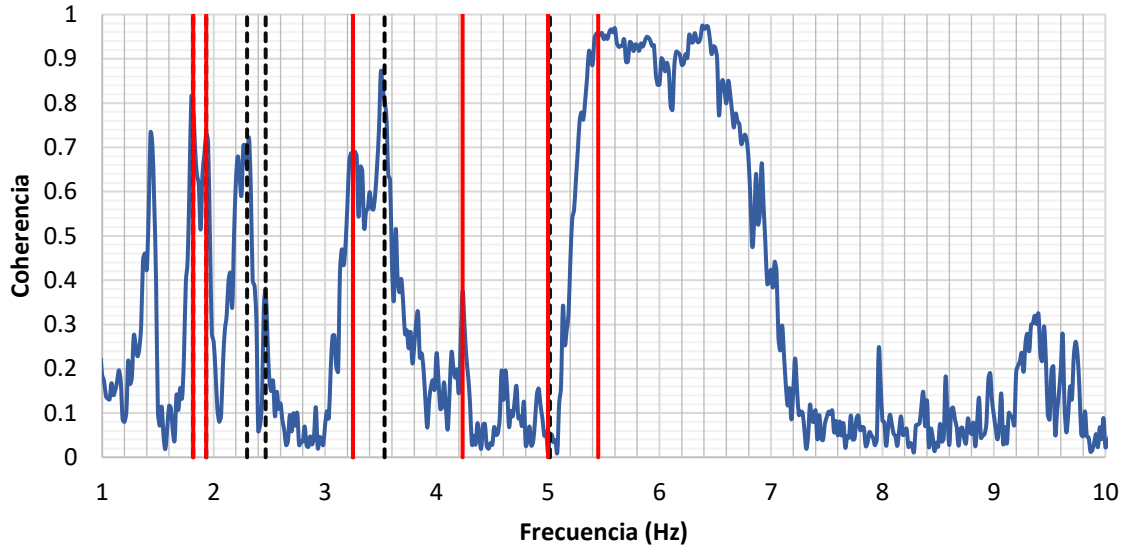


Figura 5.15 Espectro coherencia de la estación 5, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio B FI, UNAM

Las Figuras 5.16 a 5.19 son gráficas de los espectros de coherencia obtenidos de las estaciones 2 a 5 respecto a la estación ubicada en campo libre correspondientes al edificio C de la FI, UNAM, donde se muestran con líneas verticales una continua y otra discontinua los datos de frecuencias obtenidas del análisis por medio de la FFT en las direcciones norte-sur y este-oeste respectivamente.

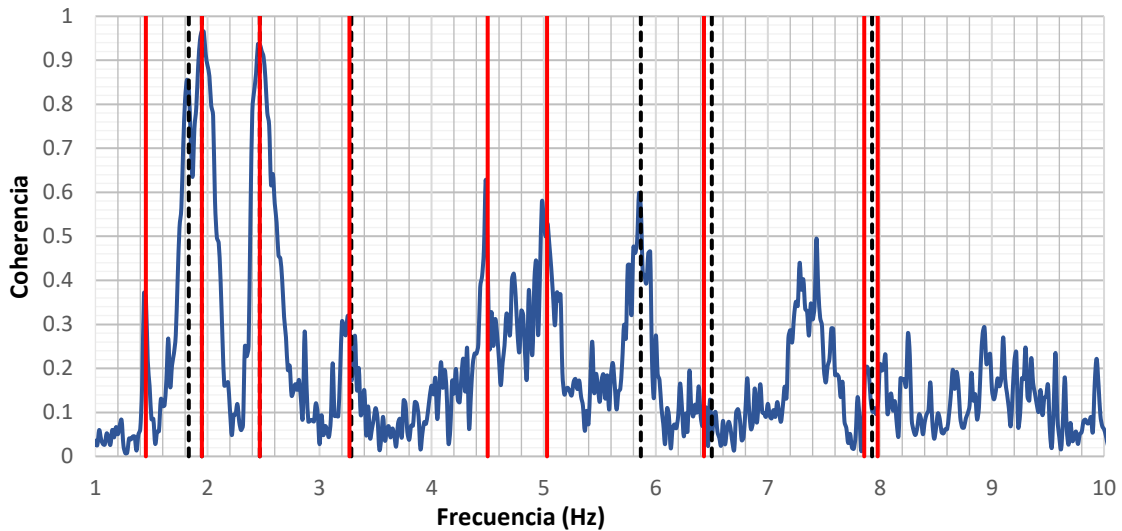


Figura 5.16 Espectro de coherencia de la estación 2, sismómetro colocado en el nivel 2 del edificio C FI, UNAM

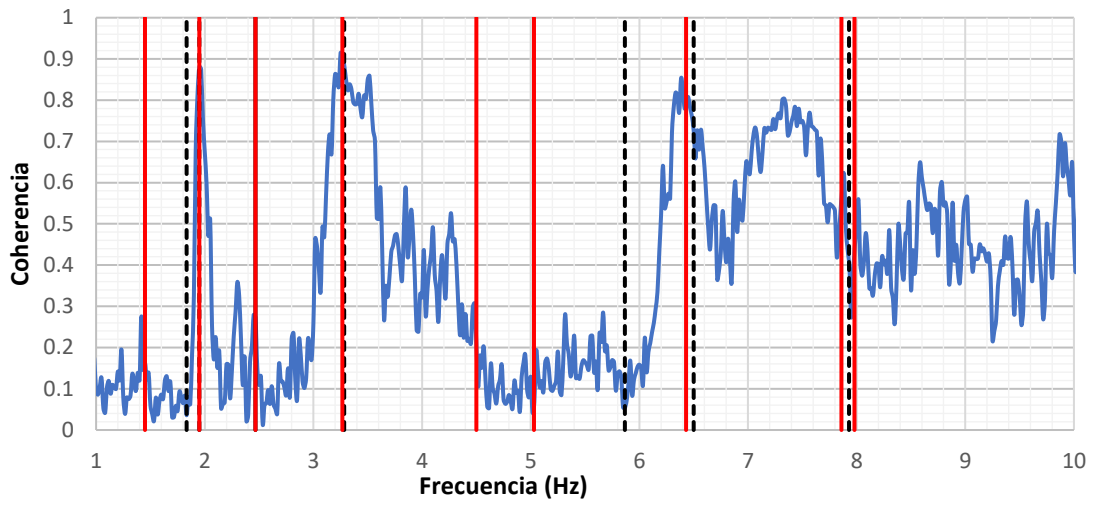


Figura 5.17 Espectro de coherencia de la estación 3, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio C FI, UNAM

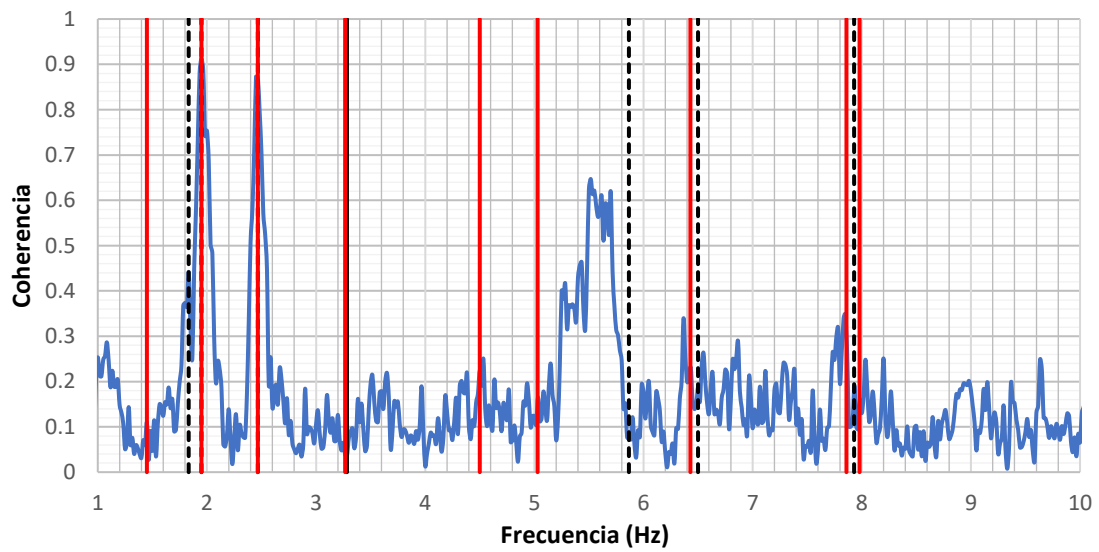


Figura 5.14 Espectro de coherencia de la estación 4, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio C FI, UNAM

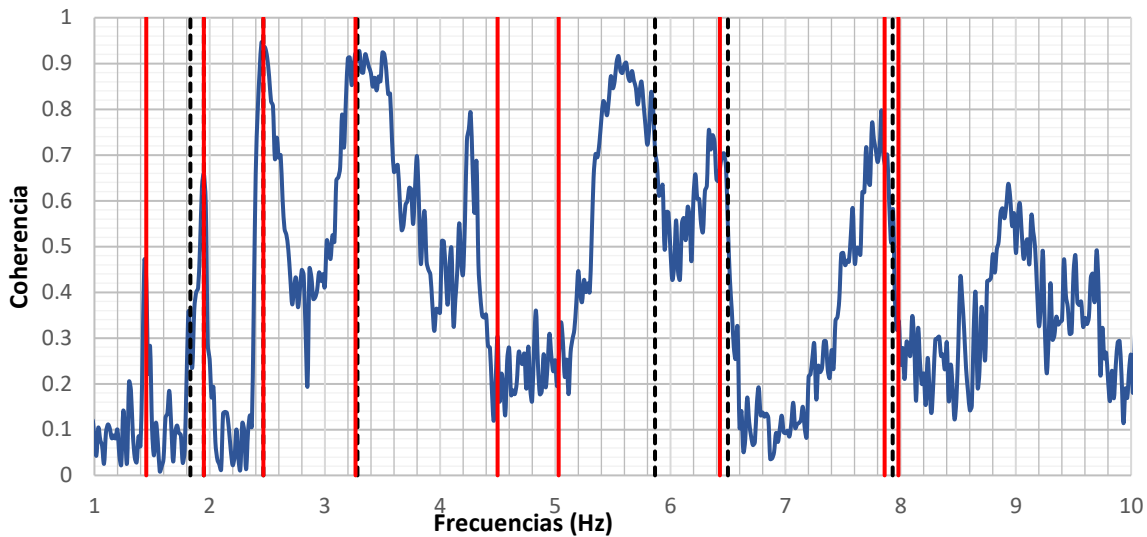


Figura 5.19 Espectro de coherencia de la estación 5, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio C FI, UNAM

Las tablas 5.3 y 5.4 son una recopilación de la información recabada de la coherencia de las señales obtenidas en las mediciones hechas con las estaciones 2 a 5 en los edificios B y C respectivamente, donde se hace la lectura de cada coherencia asociado al valor de frecuencia obtenido en el análisis de la FFT. En la misma tabla se muestran en color azul los valores que son menores a 0.5 los cuales se tomarán como valores con ruido excesivo, en color gris los valores mayores a 0.5 los cuales se aceptan como valores sin ruido importante.

Tabla 5.3 Valores de Coherencia edificio B dirección este-oeste y norte-sur

Dirección Este-Oeste					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Coherencia			
		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.93	0.52	0.74	0.56	0.56	0.72
2.30	0.43	0.76	0.38	0.46	0.7
2.47	0.41	0.76	0.44	0.78	0.38
3.25	0.31	0.06	0.96	0.08	0.68
3.53	0.28	0.04	0.84	0.06	0.82
5.02	0.20	0.7	0.84	0.06	0.04
Dirección Norte-Sur					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Coherencia			
		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.43	0.69	0.70	0.30	0.70	0.74
1.82	0.55	0.91	0.94	0.86	0.8

1.93	0.52	0.68	0.6	0.56	0.72
3.25	0.31	0.06	0.96	0.08	0.68
4.23	0.24	0.28	0.16	0.24	0.36
5.00	0.20	0.76	0.92	0.2	0.06
5.45	0.18	0.8	0.9	0.36	0.96

Tabla 5.4 Valores de Coherencia edificio C dirección este-oeste y norte-sur

Dirección Este-Oeste					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Coherencia			
		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.83	0.55	0.85	0.06	0.45	0.25
1.95	0.51	0.95	0.86	0.9	0.65
2.47	0.41	0.92	0.28	0.85	0.92
3.28	0.30	0.3	0.9	0.05	0.9
5.87	0.17	0.6	0.1	0.12	0.7
6.50	0.15	0.1	0.75	0.25	0.7
7.93	0.13	0.2	0.6	0.15	0.7
Dirección Norte-Sur					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Coherencia			
		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.45	0.69	0.36	0.15	0.1	0.4
1.95	0.51	0.96	0.86	0.9	0.65
2.47	0.41	0.92	0.28	0.85	0.92
3.27	0.31	0.3	0.92	0.05	0.9
4.50	0.22	0.6	0.25	0.18	0.2
5.03	0.20	0.5	0.1	0.1	0.3
6.43	0.16	0.1	0.8	0.2	0.7
7.86	0.13	0.2	0.6	0.35	0.8
7.98	0.13	0.2	0.6	0.2	0.7

#### 5.2.4 ESPECTROS DE FASE

Mediante los periodos obtenidos en la FFT y los valores de coherencia obtenidos es posible determinar el movimiento general de cada edificio estudiado. A continuación se muestran las Figuras 5.20 a 5.23 donde se grafican los espectros de fase que se obtuvieron de la medición del edificio B de la FI, UNAM con las estaciones 2 a 5 respecto a la estación ubicada en campo libre, donde se muestra con una línea vertical continua y otra discontinua los valores de frecuencias

obtenidos en la FFT correspondientes a los periodos estructurales en la dirección de estudio norte-sur y este-oeste respectivamente.

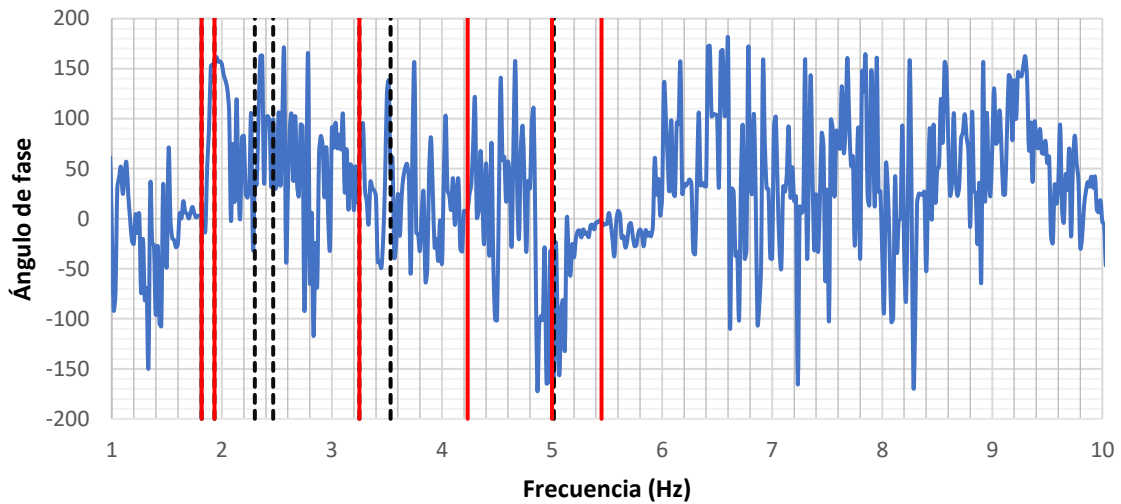


Figura 5.20 Espectro de fase de la estación 2, sismómetro colocado en el nivel 2 del edificio B de la FI, UNAM

La Figura 5.20 presenta dos tipos de líneas verticales las cuales corresponden a las frecuencias obtenidas de la FFT las líneas continuas representan frecuencias en la dirección de análisis este-oeste, mientras que las líneas discontinuas representan frecuencias en la dirección de análisis norte-sur; lo cual se aplica para las figuras que se muestran a continuación.

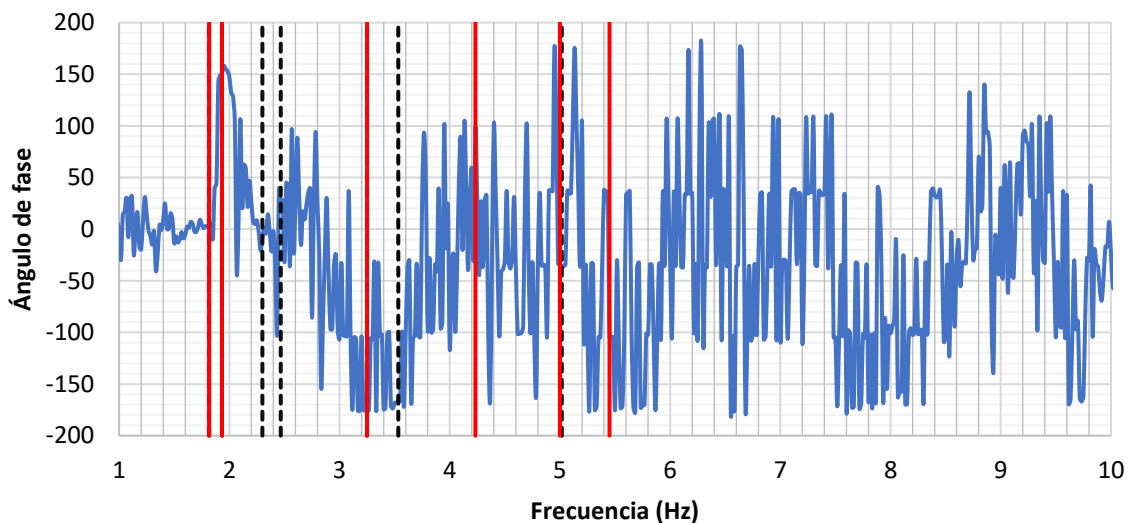


Figura 5.21 Espectro de fase de la estación 3, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio B de la FI, UNAM



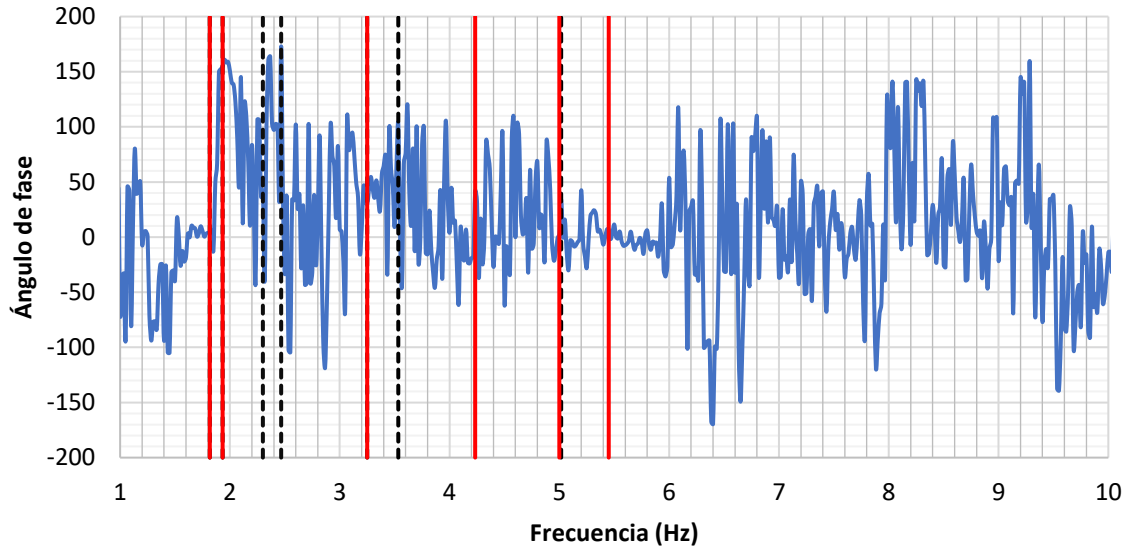


Figura 5.22 Espectro de fase de la estación 4, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio B de la FI, UNAM.

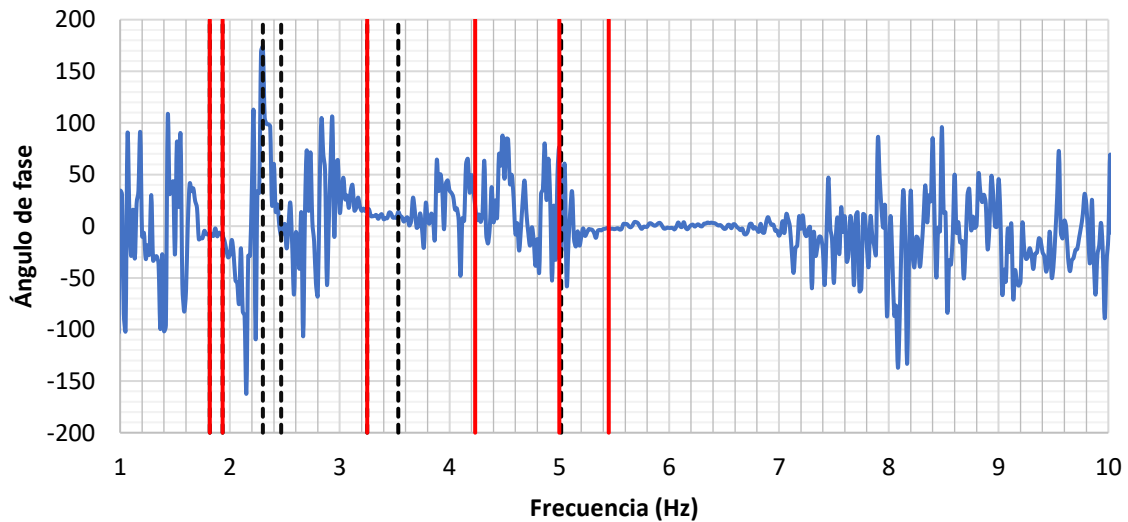


Figura 5.23 Espectro de fase de la estación 5, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio B de la FI, UNAM.

En las Figuras 5.24 a 5.27 se grafican los espectros de fase que se obtuvieron de la medición del edificio C de la FI, UNAM con las estaciones 2 a 5 respecto a la estación ubicada en campo libre, donde se muestra con una línea vertical continua y otra discontinua los valores de frecuencias obtenidos en la FFT correspondientes

a los periodos estructurales en la dirección de estudio norte-sur y este-oeste respectivamente.

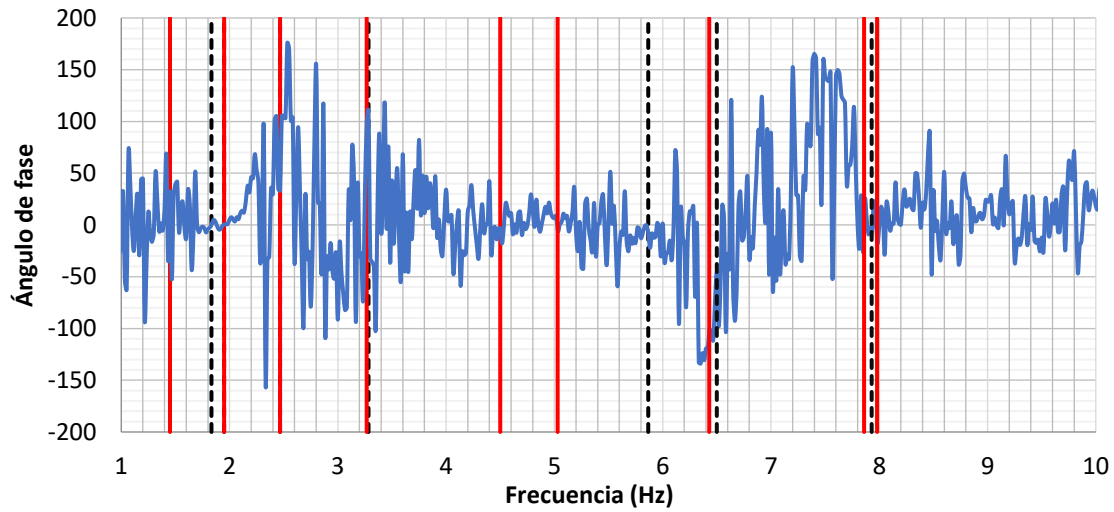


Figura 5.24 Espectro de fase de la estación 2, sismómetro colocado en el nivel 2 del edificio C de la FI, UNAM

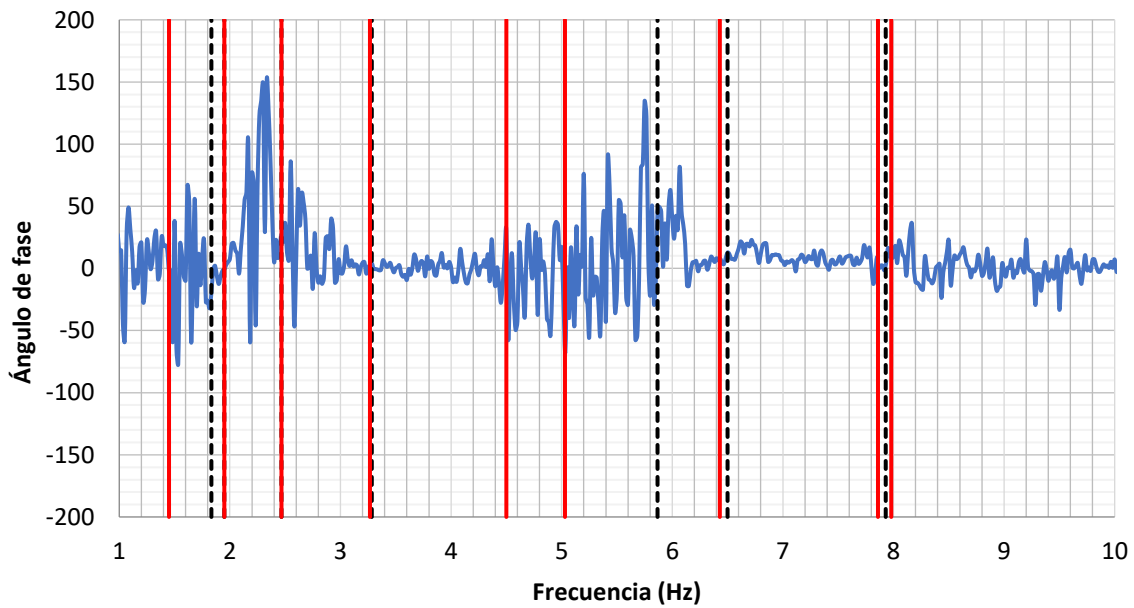


Figura 5.25 Espectro de fase de la estación 3, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio C de la FI, UNAM

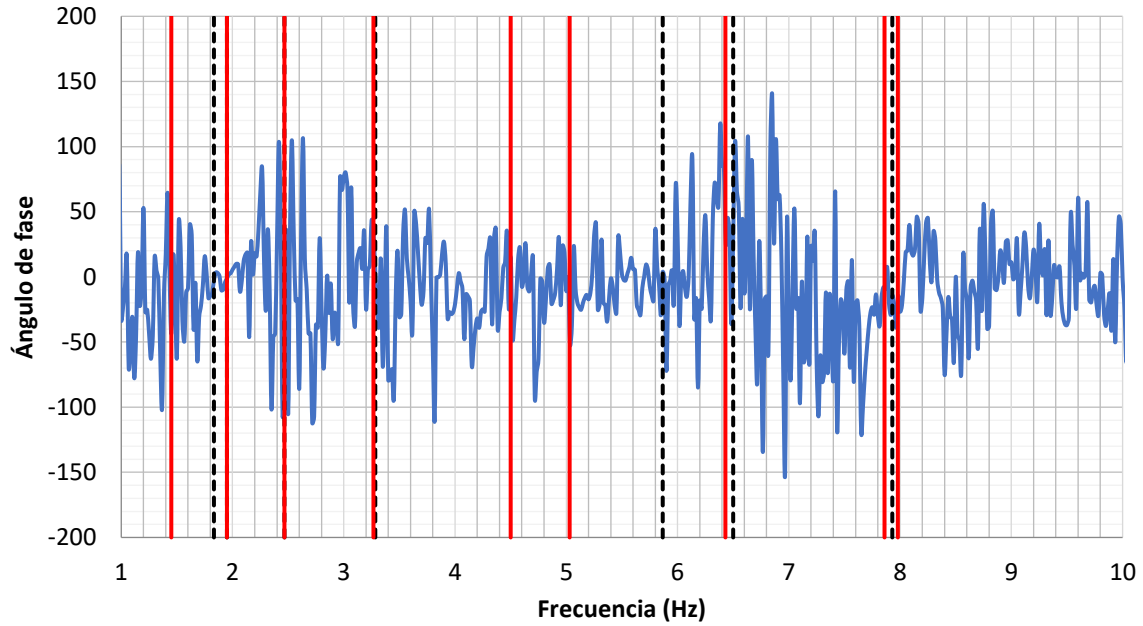


Figura 5.26 Espectro de fase de la estación 4, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio C de la FI, UNAM

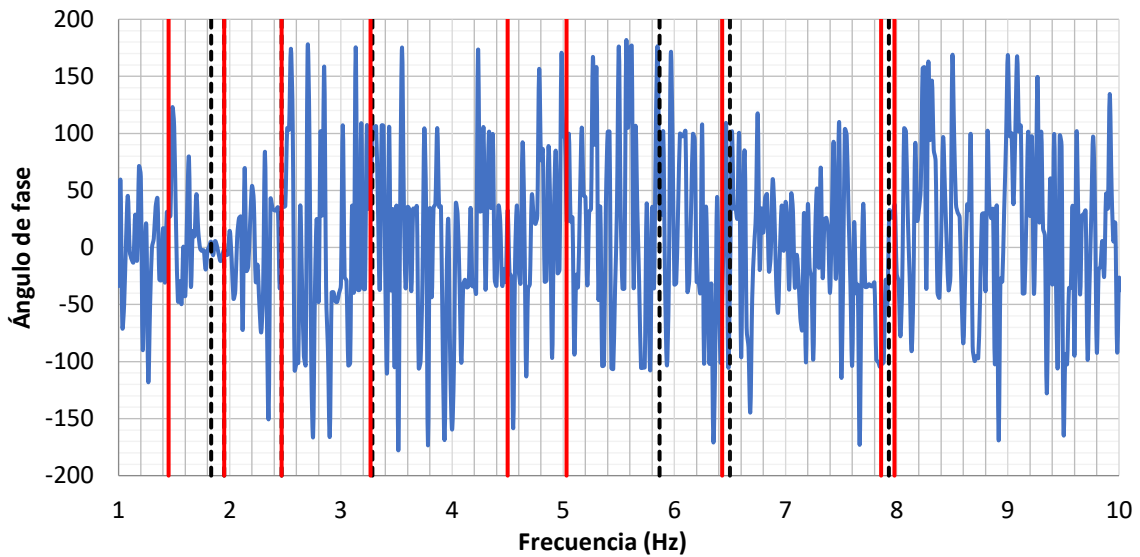


Figura 5.27 Espectro de fase de la estación 5, sismómetro colocado en el nivel 4 del edificio C de la FI, UNAM

Las tablas 5.5 y 5.6 son una recopilación de la información recabada de los espectros de fase de las señales obtenidas en las mediciones hechas con las estaciones 2 a 5 en los edificios B y C, donde se hace la lectura de cada dato de fase asociado al valor de frecuencia obtenido mediante el análisis de la FFT. En

estas tablas se visualizan en color azul los valores que corresponden a ruido obtenidos mediante los espectros de coherencia del subcapítulo 5.2.4 y de color gris los valores aceptables o más limpios sin ruido importante, obtenidos mediante los espectros de coherencia en el capítulo 5.2.4.

Tabla 5.5 Valores de ángulos de fase edificio B dirección este-oeste y norte-sur

Dirección Este-Oeste					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Ángulos de fase			
		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.82	0.55	5	5	5	10
1.93	0.52	155	150	155	10
2.30	0.43	30	20	40	170
2.47	0.41	30	30	160	10
3.25	0.31	90	175	40	15
3.53	0.28	100	160	100	10
5.02	0.20	160	40	0	50
Dirección Norte-Sur					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Ángulos de fase			
		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.82	0.55	6	5	5	10
1.93	0.52	160	150	155	10
3.25	0.31	95	175	40	15
4.23	0.24	10	100	20	15
5.00	0.20	165	60	0	50
5.45	0.18	5	170	10	0

Tabla 5.6 Valores ángulos de fase edificio C dirección este-oeste y norte-sur

Dirección Este-Oeste					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Ángulos de fase			
		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.83	0.55	0	10	0	0
1.95	0.51	0	0	0	0
2.47	0.41	30	10	110	40
3.28	0.30	100	0	0	50
5.87	0.17	0	30	40	30
6.50	0.15	50	10	35	110
7.93	0.13	10	0	40	50
Dirección Norte-Sur					
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Ángulos de fase			

		ESTR 2	ESTR 3	ESTR 4	ESTR 5
1.45	0.69	0	0	40	30
1.95	0.51	0	0	0	0
2.47	0.41	30	20	110	40
3.27	0.31	100	0	40	30
4.50	0.22	10	0	30	80
5.03	0.20	10	70	50	100
6.43	0.16	120	10	120	110
7.86	0.13	30	0	40	105
7.98	0.13	20	20	40	80

Mediante los datos de las tablas 5.5 y 5.6 es posible determinar que para el edificio B se presenta un movimiento combinado debido a que existe valores cercanos a 0 y a 180, lo que expresa que el movimiento es de torsión o rotación respectivamente.

Mientras que en el edificio C los valores obtenidos en la tabla 5.6 son en su mayoría cercanos a 0 por lo el movimiento presente es de traslación.

Los periodos estructurales obtenidos por la FFT se corroboraron mediante los espectros de potencia, al graficar los valores de frecuencia obtenidos en las gráficas de la FFT con una línea vertical continua en las gráficas de los espectros de potencia, observando que las frecuencias coincidían con los picos en dichas gráficas.

Sin embargo, debido a la incertidumbre presente en los valores de los resultados de los espectros de coherencia por la presencia de ruido, se consideró necesario revisar, a su vez, los valores de periodos mediante el modelado estructural de los edificio B y C con el uso del programa SAP2000 (CSI, 2018), como se muestra en el capítulo 4.3, para corroborar la información obtenida.

La tabla 5.7 es una comparación de los periodos obtenidos mediante vibraciones ambientales y la modelación del edificio B de la FI, UNAM en el programa SAP2000 (CSI, 2018).

Tabla 5.7 Valores de periodos de vibrar en edificio B

Periodos con vibración ambiental (s)		Periodos con SAP2000 (CSI, 2018) (s)	
este-oeste	norte-sur	este-oeste	norte-sur
0.55	0.55	0.55	0.49
0.43	0.24	0.19	0.30
0.41	0.20	0.14	0.17
0.28	0.18		0.15
0.20			
0.18			

En la tabla 5.7 se pueden visualizar que los valores obtenidos de periodos tanto por el método de vibraciones ambientales y el programa SAP2000 (CSI, 2018) son semejantes en el primer y segundo modo de vibrar, pero conforme se revisan los siguientes modos estos tienden a ser diferentes, esto se debe en que al momento de realizar las mediciones de vibración ambiental existe la presencia de mucho ruido.

De la misma manera está presente un acoplamiento en los periodos en el primer modo de vibrar obtenidos mediante vibraciones ambientales, por lo que al revisar las gráficas de FFT en dirección norte-sur del edificio B se encontró un pequeño pico con una frecuencia de 1.433 Hertz el cual para poder estar seguros de su participación en la estructura se revisó mediante espectros de coherencia tomando las señales de los equipos 4 y 5 en dirección norte-sur como lo muestra la Figura 5.28, para diferenciar los datos obtenidos en las Figuras 5.12 a 5.15.

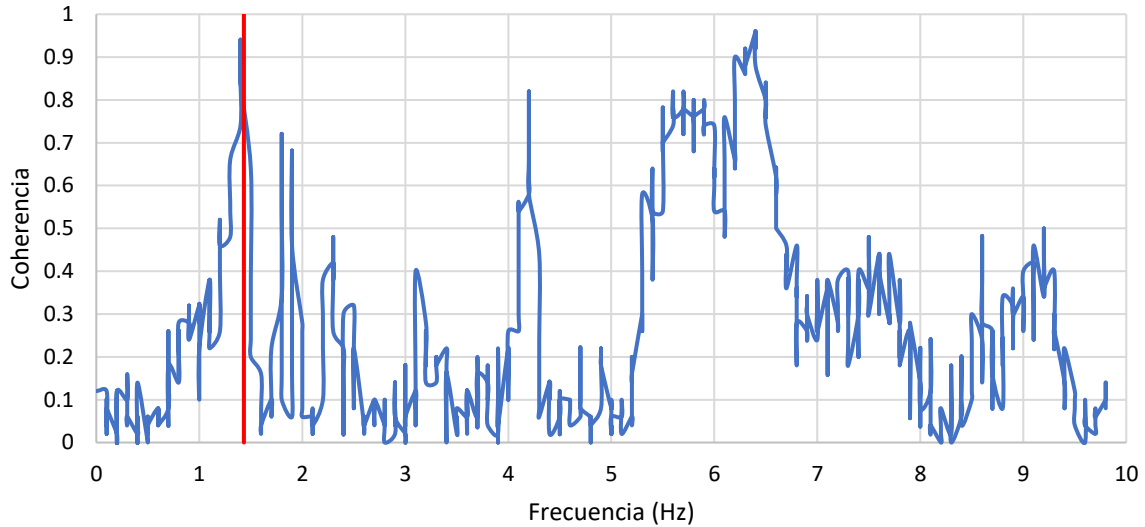


Figura 5.28 Espectro de coherencia entre las estaciones 04 y 05 dirección norte-sur edificio B FI, UNAM.

El valor de coherencia obtenido de la Figura 5.28 es cercano a 1 por lo que la frecuencia 1.433 Hertz (graficada con una línea vertical continua) con periodo de 0.69 segundos tiene mucha influencia importante en el edificio B en la dirección norte-sur.

La Figura 5.29 es el espectro de ángulo de fase obtenido en dirección norte-sur entre las estaciones 4 y 5 para corroborar el tipo de movimiento que se presenta asociado a la frecuencia 1.433 Hertz que se muestra graficado con una línea vertical continua.

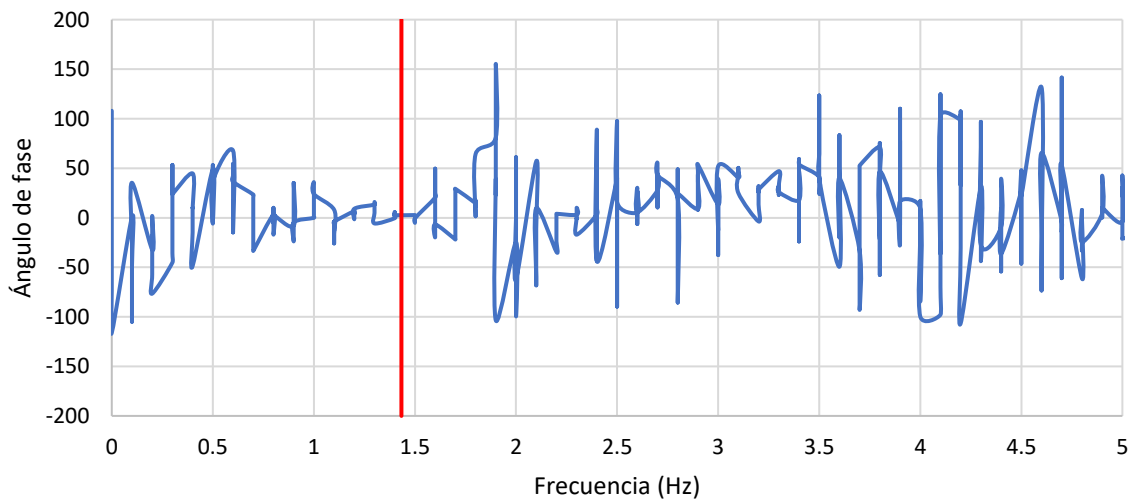


Figura 5.29 Espectro de fase entre las estaciones 4 a 5 en la dirección norte-sur edificio B FI, UNAM.

La Figura 5.29 nos da un valor asociado a la frecuencia de 1.433 Hertz de 0 grados por lo que el movimiento presente en esta frecuencia es de traslación.

Por otra parte, al momento de modelar con el programa SAP2000 (CSI, 2018) se tuvo que realizar diversas modificaciones a los valores nominales de resistencia de algunos elementos a diferencia de cómo fueron diseñados originalmente respecto a las especificaciones presentes en el subcapítulo 4.1.1 con el fin de poder igualar los valores obtenidos de periodos tanto en el programa y los obtenidos mediante vibración ambiental debido a la presente disminución en la resistencia en las columnas presentes en el edificio B. Estas mediciones de resistencia se obtuvieron mediante el uso del equipo llamado esclerómetro, con el cual en cada nivel de la estructura se midieron diferentes columnas del edificio para obtener los diversos valores de resistencia que poseen actualmente, la tabla 5.8 muestra los valores de resistencia obtenidos en cada columna medida.

Tabla 5.8 Resistencias medidas con esclerómetro en edificio B FI, UNAM

EDIFICIO B				
Nivel	Ejes		Valor promedio con esclerómetro	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>
PB	2	A	21.9	214.7
	6	A	25.7	251.8
	9	A	33.3	327.0
	2	B	28.5	279.6
	1	D	22.0	215.8
N1	1	D	25.8	253.1
	8	B	28.3	278.0
	8	A	12.8	125.1
	7	B	16.8	165.1
N2	1	D	11.6	113.5
	4	B	28.2	276.6
	4	A	17.6	172.7
N3	1	D	12.2	119.4
	1	A	20.7	202.7
	8	A	11.9	116.5
N4	1	D	18.8	183.9
	3	B	17.3	169.2
	3	A	24.7	242.0



	2	A	13.0	127.5
	10	B	35.8	350.7
	9	B	21.8	213.4

Mediante la tabla 5.8 podemos ver que la mitad de las columnas medidas presentan una resistencia menor a el valor nominal que se tiene especificada de 210 kg/cm<sup>2</sup> en el subcapítulo 4.1.1.

Estas modificaciones hechas de los valores nominales de resistencia en el programa SAP2000 (CSI, 2018) muestra que el edificio B ha presentado un deterioro aun cuando este edificio no presente un daño aparentemente visible, esto debido al tiempo de vida útil, los diferentes eventos sísmicos y de viento que ha soportado, entre otros.

La tabla 5.9 es una comparación de los periodos obtenidos mediante vibraciones ambientales, la modelación del edificio C de la FI, UNAM en el programa SAP2000 (CSI, 2018) y la información previa del cálculo de los periodos estructurales mediante el método estático que se muestra a continuación (Fernández, 2013).

*Tabla 5.9 Valores de periodos de vibrar en edificio C*

Periodos con vibraciones ambientales (s)		Valores previos de periodos (Fernández, 2013) (s)		Periodos con SAP2000 (CSI, 2018) (s)	
N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W
0.69	0.55	0.76	0.57	0.70	0.65
0.22	0.17	0.20	0.17	0.21	0.11
0.20	0.15	0.10	0.10	0.15	0.05
0.16	0.13	0.08	0.08	0.07	0.03
0.13					
0.13					

La tabla 5.9 muestra la comparación de los valores obtenidos de periodos por el método de vibraciones ambientales y por el programa SAP2000 (CSI, 2018) muestra una sola similitud en el primer modo de vibrar en dirección norte-sur, pero en los siguientes modos estos valores resultan ser distinto, mientras que al hacer una comparación entre los valores previos (Fernández, 2013) y los obtenidos mediante el programa SAP2000 (CSI, 2018), existe una cierta similitud en los

valores obtenidos. Estas diferencias entre los valores de periodos mediante el método de vibraciones ambientales y el programa SAP2000 (CSI, 2018) se debe al ruido presente al momento de realizar las mediciones de los registros de velocidades, los cuales a comparación del edificio B estos presentan un ruido mayor.

Por otra parte, al momento de realizar el modelado en el programa SAP2000 (CSI, 2018) de la estructura fue necesario hacer cambios en los valores nominales de resistencia de algunos elementos a como se habían especificado en el subcapítulo 4.1.2, debido a las mediciones hechas en las columnas con el equipo llamado esclerómetro, el cual se usó para poder determinar la resistencia presente en estos elementos actualmente los cuales se presentan en la tabla 5.10.

*Tabla 5.10 Resistencias medidas con esclerómetro en edificio C FI, UNAM*

EDIFICIO C				
Nivel	Ejes		Valor promedio con esclerómetro	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>
PB	A	8	26.8	262.9
	A	4	32.3	317.2
	A	1	28.8	282.9
	A'	1	24.8	243.6
	B	1	27.7	271.9
N1	10	A	29.4	288.4
	5	A	29.3	287.8
	5	B	31.3	307.4
N2	10	A	24.3	238.7
	7	A	28.4	278.6
	7	B	30.5	299.2
N3	10	A	28.8	282.5
	8	A	30.0	294.3
	9	A	36.2	355.1
	2	A	23.5	230.5
N4	3	A	33.8	331.1
	4	B	34.3	336.0
	9	A	28.7	281.7
	10	A	24.4	239.4

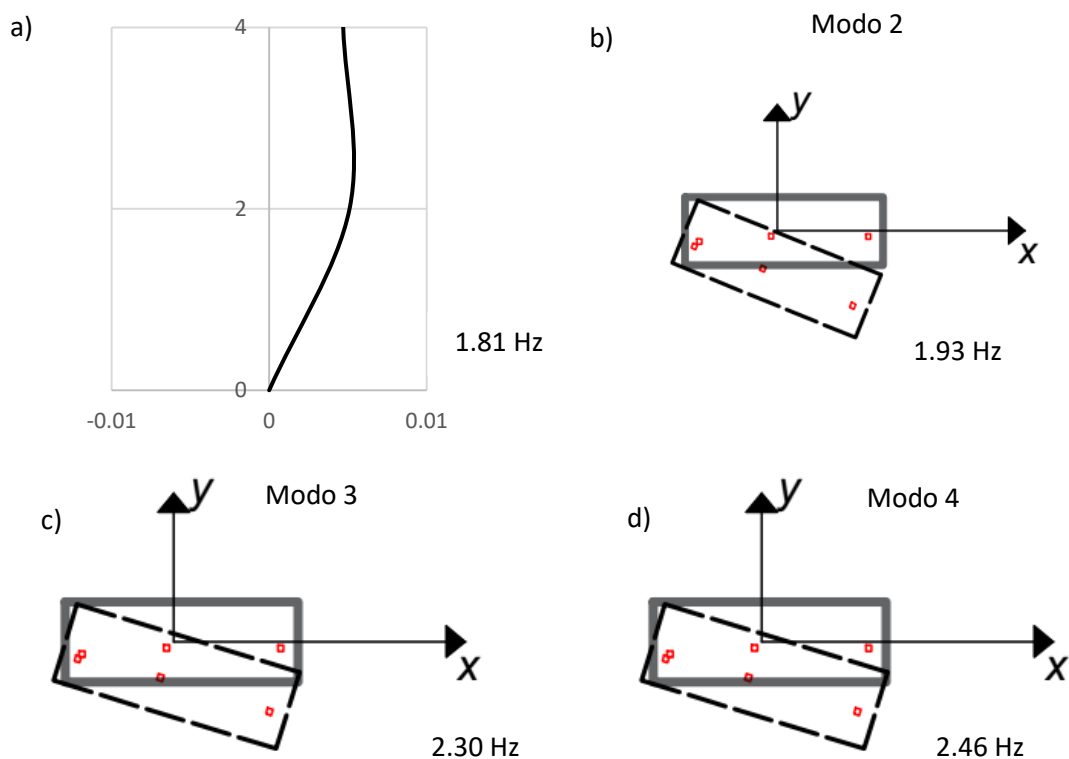
La tabla 5.10 nos permite observar que las columnas presentan una disminución en la resistencia nominal que se presenta en el subcapítulo 4.1.2 de 350 kg/cm<sup>2</sup>.

Esta reducción en el valor nominal de resistencia hecha en el programa SAP2000 (CSI, 2018) fue con el fin de poder asimilar los valores de periodos estructurales obtenidos por el programa en cuestión a los obtenidos mediante vibraciones ambientales, lo cual muestra que el edificio C presenta un daño no aparente debido al tiempo de vida útil de la estructura y de igual manera a los diferentes eventos sísmicos y de viento que ha soportado.

### 5.3 FORMAS MODALES

Para obtener las formas modales de una estructura es recomendable tenerla instrumentada en cada nivel; en este estudio, no fue posible instrumentar cada nivel de los edificios B y C, ya que los sismómetros se colocaron en los niveles 2 y 4 de acuerdo a los planos presentados en el subcapítulo 4.2, por lo que las formas modales encontradas se presentan en forma vertical para movimientos de traslación para las estaciones 2 y 4, para movimientos de rotación, los resultados se presentan en planta empleando la información de las estaciones 3, 4, y 5, como se muestra a continuación:

La Figura 5.30 muestra las formas modales obtenidas con los valores de amplitud en los espectros de la FFT de los modos encontrados en dirección este-oeste del edificio B, donde se presenta un movimiento de traslación en el modo 1 y movimientos acoplados del modo 2 al 7.



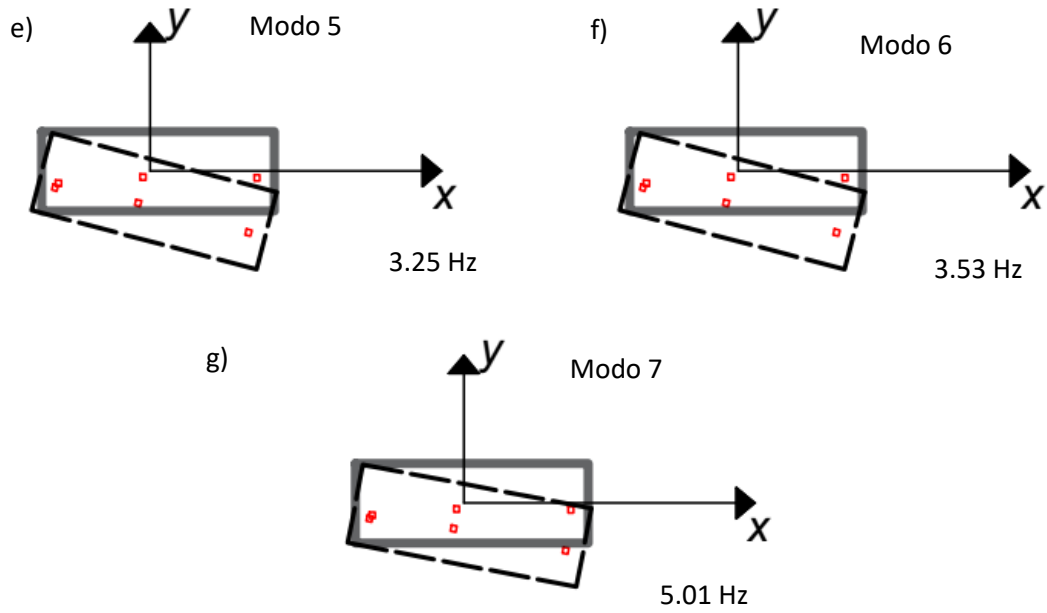
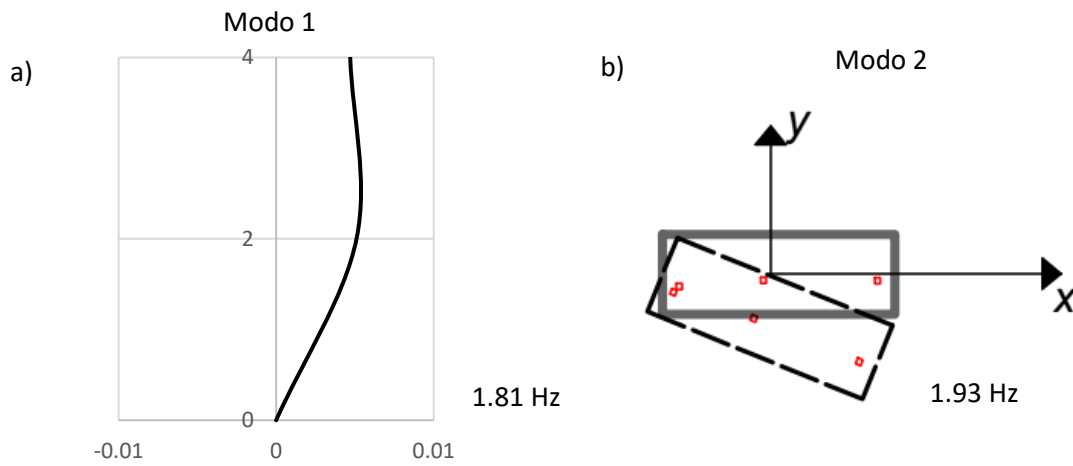


Figura 5.30 Formas modales en la dirección este-oeste edificio B FI, UNAM, donde a) representa un movimiento de traslación, b), c), d), e), f) y g) representan un movimiento de rotación

La Figuras 5.31 muestra las formas modales obtenidas con los valores de amplitud en los espectros de la FFT de los modos localizados en dirección norte-sur del edificio B, donde se muestra en el modo 1 un movimiento de traslación y movimientos acoplados del modo 2 al 6



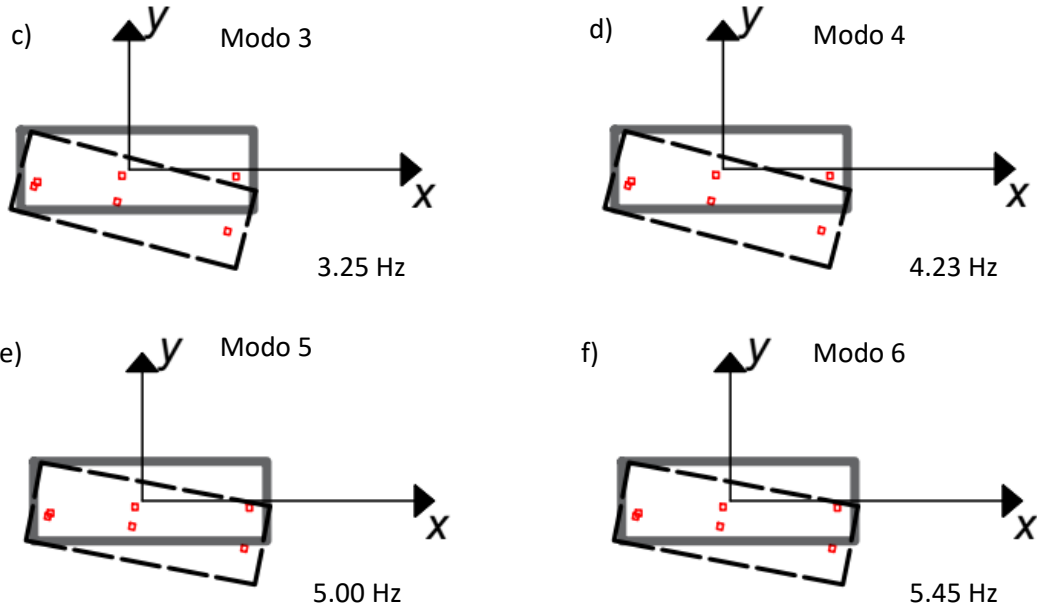
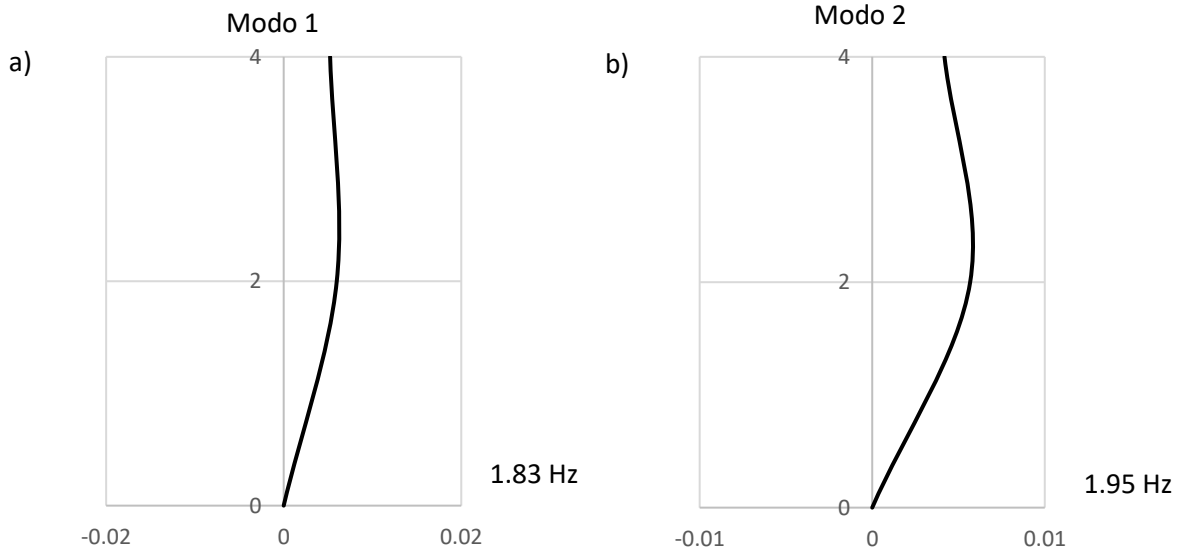


Figura 5.31 Formas modales en la dirección norte-sur edificio B FI, UNAM, donde a) representa un movimiento de traslación, b), c), d), e) y f) representan un movimiento de rotación

La Figura 5.32 muestra las formas modales obtenidas con los valores de amplitud en los espectros de la FFT de los modos localizados en dirección este-oeste del edificio C, donde se presenta un movimiento de traslación en los modos 1,2,5 y 7 y un movimiento de rotación en los modos 3,4 y 6.



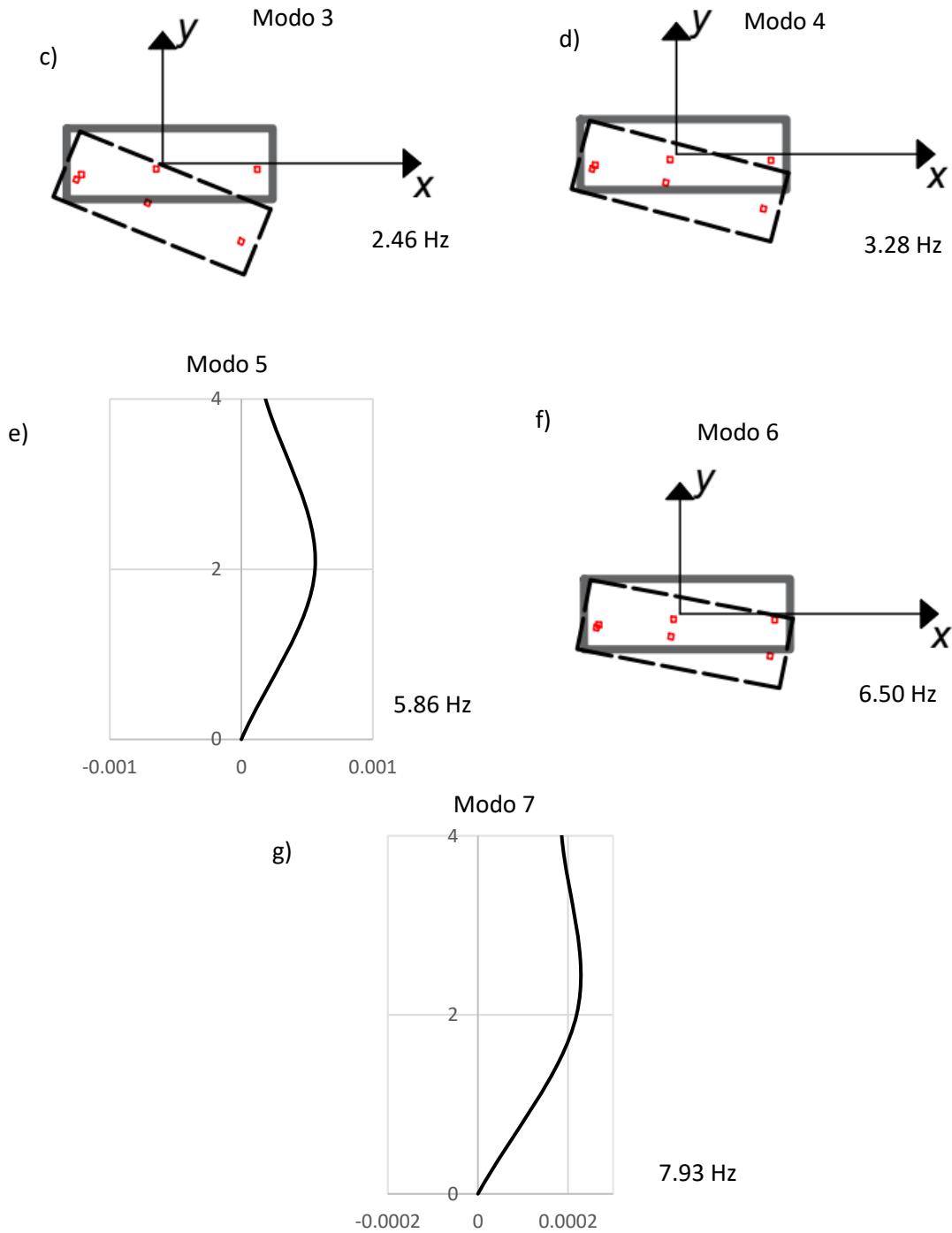
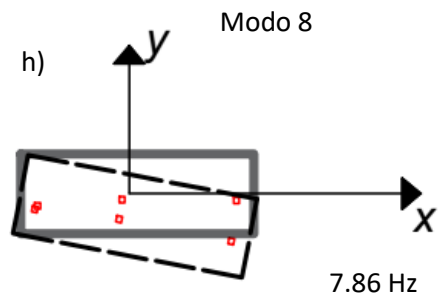
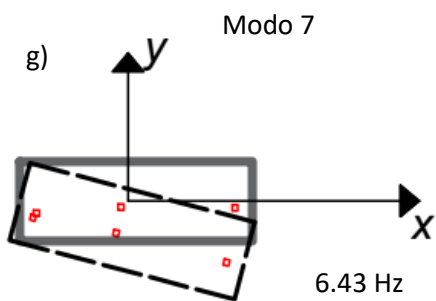
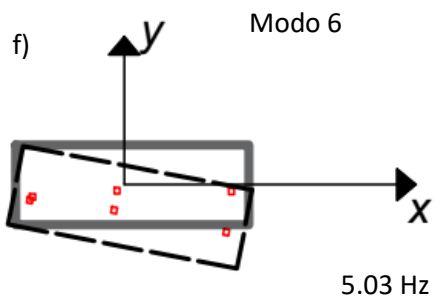
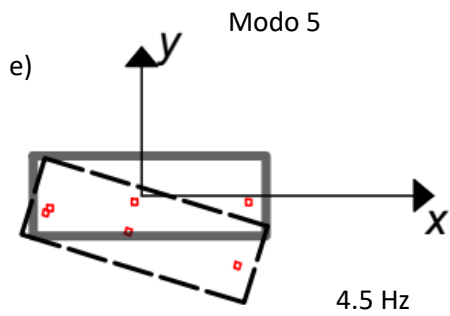
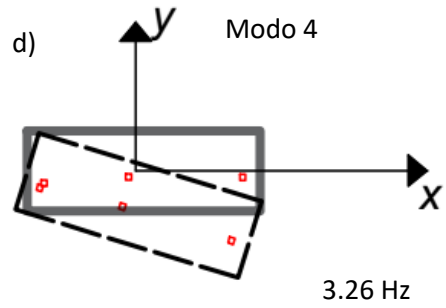
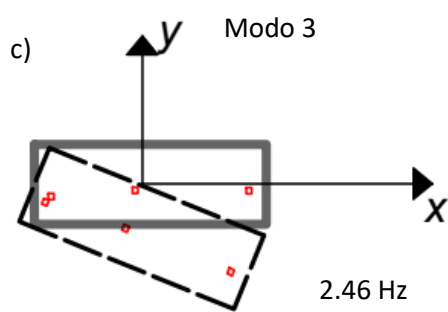
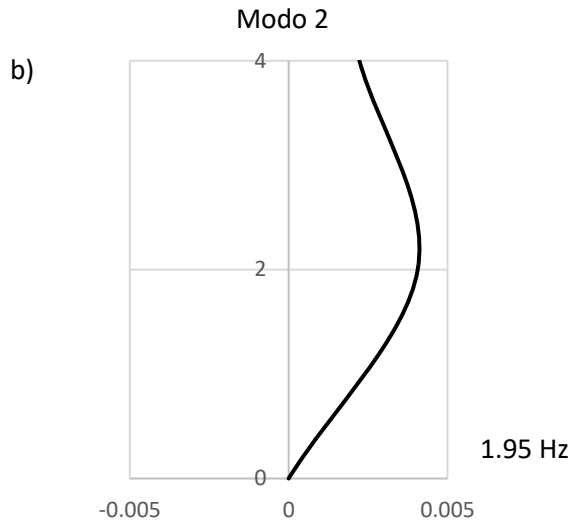
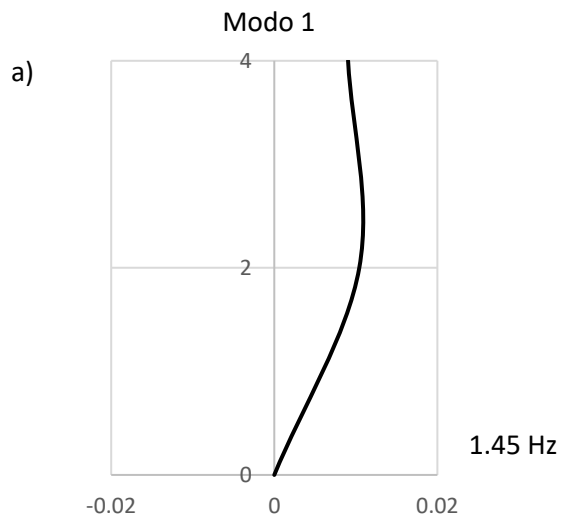


Figura 5.32 Formas modales en la dirección este-oeste edificio C FI, UNAM, donde a), b), e) y g) representan un movimiento de traslación, c), d) y f) representan un movimiento de rotación

La Figura 5.33 muestra las formas modales obtenidas con los valores de amplitud en los espectros de la FFT de los modos localizados en dirección norte-sur del edificio C, donde se presenta un movimiento de traslación en los modos 1,2 y 9 y un movimiento de rotación en los modos 3,4,5,6,7 y 8.





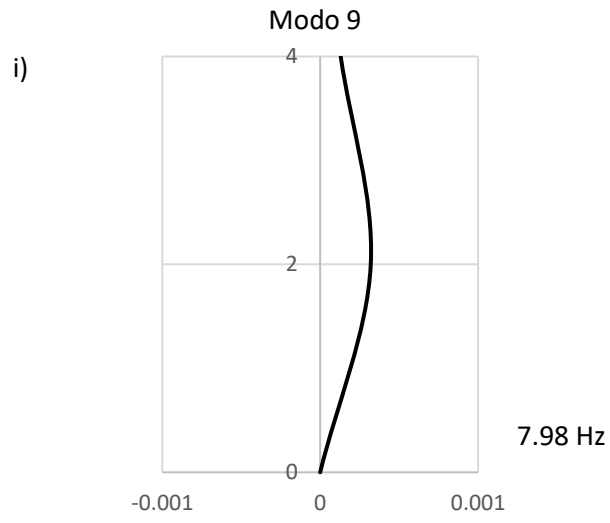


Figura 5.33 Formas modales en la dirección norte-sur edificio B FI, UNAM, donde a), b) e i) representan un movimiento de traslación, c), d), e), f), g) y h) representan un movimiento de rotación

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La salud estructural es un tema que ha cobrado gran importancia en la actualidad. Llevar a cabo los estudios correspondientes en estructuras actuales es fundamental, pues existe una importante cantidad de edificaciones antiguas que hoy en día ofrecen un servicio importante en la vida cotidiana del ser humano, de las cuales no se conocen las condiciones que actualmente tienen. El conocer estas características permitirá tomar las medidas preventivas adecuadas de tal forma que, ante la acción de un sismo futuro, dichas estructuras se comporten adecuadamente.

Las estructuras de la Facultad de Ingeniería antes estudiadas son estructuras con un largo tiempo de vida transcurrido, sus valores nominales con las que fueron construidas han sufrido un cambio que no necesariamente es aparente, esto se debe a las continuas inclemencias del tiempo y los diversos eventos sísmicos a las que han estado sometidas y que han soportado, de igual forma se debe al constante trabajo que se presenta en ellas. Lo anterior obliga a desarrollar los estudios necesarios para conocer sus condiciones actuales.

Una muestra de lo anterior se observó al obtener los periodos estructurales a través de vibraciones ambientales y compararlos con los periodos obtenidos con el modelo analítico usando el programa SAP2000. En el programa SAP2000 fue necesario modificar los valores nominales originales de los materiales para que, de esta manera, se obtuvieran periodos de vibrar similares a los obtenidos con el estudio de vibraciones ambientales.

Estos valores nominales de los materiales, fueron modificados tomando en cuenta los datos de resistencia adquiridos con el esclerómetro al medir la resistencia presente en las columnas de los edificios B y C de la FI, UNAM, el cual mostro un deterioro en la resistencia nominal anteriormente especificada.

De los valores de periodo de vibrar obtenidos para el edificio B, tanto en el programa SAP2000 como por vibraciones ambientales, resultaron ser más cercanos y semejantes. Por otro lado, los valores de periodos obtenidos para el edificio C fueron considerablemente diferentes entre los obtenidos en el programa de análisis y por vibraciones ambientales. En este caso, los valores de las propiedades de los materiales se cambiaron de manera importante. Para el autor de esta tesis, esto se debe a la presencia de mucho ruido en la señal obtenida o bien, a que las propiedades de los materiales se han deteriorado considerablemente.

Obtener los espectros de coherencia también es una forma de garantizar información certera y confiable. Los valores obtenidos de coherencia para el edificio B resultaron ser en su mayoría más limpios sin una presencia de ruido importante, por el otro lado, los valores de coherencia obtenidos para el edificio C indicaron que los registros de vibraciones ambientales podrían estar contaminados con la presencia de ruido; esto es una explicación de la variación en los periodos obtenidos en el programa SAP2000 y los obtenidos por vibraciones ambientales.

Trabajar con registros sísmicos de vibraciones ambientales mediante un método espectral es un proceso de análisis minucioso, esto se debe a que, ante la presencia de cualquier vibración, ésta se capta en el registro y, en consecuencia, formará parte del ruido. Por esta razón, es recomendable utilizar un programa de cómputo que permita limpiar la señal a través de filtros pasabanda para tener información relacionada únicamente en el rango de frecuencias de interés, que generalmente oscilan entre los 0.1 y 10 Hz.

Debido a lo anterior, es recomendable llevar a cabo un seguimiento del comportamiento de los edificios estudiados para corroborar la información obtenida, o bien, tener lecturas más limpias y un más certeras de las estructuras.

Así mismo, se recomienda revisar si las actividades que se realizan en el edificio C, sobre todo en su planta baja, no generan vibraciones importantes que se puedan captar al momento de registrar las señales de vibraciones ambientales.

## REFERENCIAS

Akonic, (2019) *Correlación y coherencia*. Recuperado de <http://www.akonic.com.ar/Articulos/Correlacion%20y%20Coherencia.pdf>, recuperado el 3 de mayo de 2019.

Araiza, J.C., Orduña, A. y Tejeda, J. (2004). *Caracterización dinámica de Edificios Históricos*. Memoria del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro.

Augusto, C. (2018). *Condiciones de Dirichlet-Fourier*. Recuperado de: <https://temasdecalculo.com/2018/08/08/1-8-condiciones-de-dirichlet-fourier/>, recuperado el día 8 de julio de 2019

Certicalia, (2019). *¿Qué es el diagnóstico estructural?*. Recuperado de: <https://www.certicalia.com/diagnostico-estructural/que-es-el-diagnostico-estructural>, recuperado el 3 de mayo de 2019

Cortés, J. (2011). *Aplicación de series de tiempo en el monitoreo estructural*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM

CSI, Computers and Structures, Inc. (2018). SAP2000 (20.0) [Software]. Recuperado de <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>

DDF, Departamento del Distrito Federal, (1942). *Reglamento de las Construcciones y de los Servicios Urbanos en el Distrito Federal*. CDMX

DDF, Departamento del Distrito Federal, (1966). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. CDMX

Fernández, J. C., (2013). *Evaluación Técnica de la Seguridad Estructural de un Edificio de Concreto Reforzado, Diseñado y Construido durante los años 60's, en la Zona del Pedregal de la Ciudad de México*. Tesis de licenciatura, FI, UNAM

FI-UNAM, Facultad de Ingeniería. (2019). *La Facultad en Construcción Galería, Facultad de Ingeniería de la UNAM*, Recuperado de: [http://www.ingenieria.unam.mx/nuestra\\_facultad/fi\\_construccion.php#](http://www.ingenieria.unam.mx/nuestra_facultad/fi_construccion.php#), el día 20 de junio de 2019

García, O, Ayala, A., Reyes, R. y Álvarez, G. (2002). *Modelo Estructural y Medición de Vibraciones Dinámicas del Puente "Fernando Espinosa"*. Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, Puebla.

GDF, Gobierno del Distrito Federal, (2004). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. CDMX

GCM, Gobierno de la Ciudad de México, (2017). *Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México*. CDMX

Henao, Á., Botero, J., Muría, D., (2014). *Identificación de Propiedades Dinámicas de un Modelo Estructural sometido a Vibración Ambiental y Vibración Forzada empleando Mesa Vibradora*. Recuperado de SciELO, Ingeniería Sísmica: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-092X2014000200054](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2014000200054), recuperado el 15 de julio de 2019

Henao, D. (2019). *Identificación de las Propiedades Dinámicas de una Estructura sometida a Vibración Ambiental Empleando Análisis Espectral*. Medellín: Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería.

Hidalgo, M. (2009). *Teoría de Vibraciones*. Universidad de Córdoba: Publicaciones, ed. II Tít. 531.14.

Huston, D. (2011). *Structural sensing, Health monitoring, and performance evaluation*. University of Vermont Burlington, USA: Editorial CRC Press Taylor and Francis Group.

INAOE, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y electrónica, (2017). *Procesamiento digital de señales*. Recuperado de <http://ccc.inaoep.mx/~pgomez/cursos/pds/slides/S5-DFT.pdf>, el 15 de julio de 2019

Ingeniería, Ambher. (2014). *Monitoreo de la Salud Estructural*. Recuperado de <https://www.ambher.com/monitoreo-de-la-salud-estructural>, recuperado el 28 de abril de 2019.

Irarrázaval, P. (1999). *Análisis de Señales*. Departamento de Ingeniería Eléctrica Pontificia Universidad de Chile: McGraw-Hill Interamericana.

NI, National Instruments, (2018). LabVIEW (18.0) [Software]. Recuperado de <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>

Méndez, H. (2014). *Identificación de las propiedades dinámicas de una plataforma marina de perforación, basada en el monitoreo de vibraciones*. Tesis de Maestría, programa posgrado de ingeniería, UNAM

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

Radaelli, R. (2007). *Condiciones de Dirichlet*. Recuperado de: <https://cnx.org/exports/043c830c-025c-4db2-b65f-1f80b4c10842@2.pdf/condiciones-de-dirichlet-2.pdf>, recuperado el 15 de julio de 2019

Rodríguez, L., Hernández, E., Cardeña, S., Lozano, A. y Herrera, J. (2014). *Sistema de Monitoreo Estructural de Bajo Costo Basado en Redes de Sensores Inalámbricos*. Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural AC.

SARA (2019), *User's Manual*. SARA Electronic Instruments s. r. l. Italia

Silva, I. (2009). *Comparación de las Propiedades Dínámicas de Edificios*. CDMX

Teranishi, A y García, O., (2014). *Evaluación del Comportamiento de Edificios Existentes a partir de Metodologías para Calificar la Salud Estructural ante Solicitaciones Sísmicas*. Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural AC.

UPC, Universidad Politécnica de Cartagena (2019). *Series y transformadas de Fourier*. Recuperado del Departamento de Matemática aplicada y estadística, Universidad Politécnica de Cartagena: [http://www.dmae.upct.es/~paredes/am\\_ti/apuntes/Tema%202.%20Series%20y%20transformadas%20de%20Fourier.pdf](http://www.dmae.upct.es/~paredes/am_ti/apuntes/Tema%202.%20Series%20y%20transformadas%20de%20Fourier.pdf), recuperado el 8 de julio de 2019

Vizconde, A. (2017). *Estudios de vibración ambiental en edificaciones existentes*. Recuperado de: <http://edificacionesdecalidad.com/content/estudios-de-vibraci%C3%B3n-ambiental-en-edificaciones-existentes>, recuperado el 4 de junio de 2019

Zamora, G. (2016). *Análisis de Fourier vs. Análisis Modal Operacional Fortalezas y debilidades en la evaluación de la salud estructural*. Tesis de Maestría, programa de posgrado de ingeniería, UNAM

Zamora, G., Ayala, A.G. y Salgado, R. (2016). *Determinación de la Salud Estructural de Edificios – Análisis de Fourier vs. Análisis Modal Operacional*. Memorias del XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Mérida Yucatán.

Zumaya, M. A. (2011). *Dictamen Técnico de Seguridad Estructural de un Edificio Escolar de Concreto Reforzado, Seis Niveles, Superficie de 4,310 M<sup>2</sup>. Diseñado y Construido entre los años 1952 y 1954, en la Zona del Pedregal de la Ciudad de México*. Tesis de licenciatura, FI, UNAM