

**CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL LABORATORIO
DE ESTRUCTURAS DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

Grecia Sanguino Camacho.
ID: 000221901.
Mayo 2017.

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga
Escuela de Ingenierías y Administración
Facultad de Ingeniería Civil
Comité de trabajos de grado.

**CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL LABORATORIO ii
DE ESTRUCTURAS DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

Grecia Sanguino Camacho.
ID: 000221901.

Director:
PhD Gustavo Andrés Ospina Idarraga

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga
Escuela de Ingenierías y Administración
Facultad de Ingeniería Civil
Comité de trabajos de grado.
Julio 2017.

Nota de aceptación:

iii

Firma Presidente del Jurado

Firma Jurado N°1

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, Mayo del 2017.

AGRADECIMIENTOS

iv

Agradezco a Dios por el don de la vida, por su inmenso amor y misericordia, él me ha llenado de innumerables bendiciones y tesoros; me rodeado de personas maravillosas, de una familia amorosa; me ha dotado de capacidades y habilidades para desarrollarme como profesional y lo más importante, me ha dado un propósito y me ha enseñado a ser un mejor ser humano, y a través de mi vida ayudar a los demás.

A mi familia, especialmente a mis padres; durante toda mi vida se han esforzado por darme lo mejor, me formaron y enseñaron con amor en principios y valores, lo que soy hoy se los debo a ellos, les agradezco en lo más profundo de mi corazón por creer en mí, por exigirme y motivarme a ser mejor, por recordarme todos los días que agarrada de la mano de Dios todas las cosas son posibles.

Al profesor Gustavo Ospina por su apoyo y paciencia, gracias por el tiempo brindado para enseñarme y formarme, porque me ha hecho una profesional independiente, me ha hecho querer la carrera, en particular la dinámica estructural, por la oportunidad de participar en encuentros de investigación, por sus consejos y por su motivación para investigar y aprender, para ser una mejor profesional y una mejor ser humano.

Nota de aceptación:.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 1	3
REFERENTE TEÓRICO.....	3
Historia de los sismos	3
Características de los sismos.....	5
Normativa Colombiana para Construcción Sismo-resistente	7
Propiedades Dinámicas	10
Periodo y frecuencia natural	10
Rigidez	11
Amortiguamiento	12
Aislamiento Sísmico	13
Sistemas de un grado de libertad	16
Sistemas de Adquisición.....	17
Sensores	18
Tarjetas de adquisición	19
Dispositivo DAQ	19
Computadora.....	20
Metodologías de identificación.....	21
NEX-T-ERA	22
Función de transferencia.....	30
CAPÍTULO 2.....	31
METODOLOGÍA	31
Implementación de sistema de monitoreo de vibraciones	31
Ajuste de parámetros y calibración de sistema de monitoreo continuo.....	32
Selección de datos y filtrado a través de la energía de las señales	33
Análisis de información recolectada y post-procesamiento de información utilizando funciones de transferencia y la metodología ERA	36
Modelamiento estructura en SAP2000	38
CAPÍTULO 3.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
CAPITULO 4.....	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
LISTA DE REFERENCIAS	51

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados registros Coincidentes	43
Tabla 2. Resultados registros No Coincidentes	45
Tabla 3. Resultados propiedades dinámicas del pórtico sobre cimentación tradicional.....	47
Tabla 4. Resultados propiedades dinámicas del pórtico sobre aisladores de neopreno.....	47
Tabla 5. Resultados experimentales y teóricos.....	48

Figura 1. Riesgo sísmico y movimiento relativo de placas (USGS, 2011).....	4
Figura 2. Sismograma (García, 1998).....	6
Figura 3. Espectro de diseño Bucaramanga.....	9
Figura 4. Relación fuerza-desplazamiento para un resorte (García, 1998).....	11
Figura 5. Vibración libre amortiguada (PCP, 2017).....	12
Figura 6. Estructura sin aislamiento sísmico y con aislamiento sísmico (Aisladores, 2015)	14
Figura 7. Aislador de Neopreno.(James M., 2013).....	14
Figura 8. Curva de histéresis aislador de Neopreno. (Dynamic Isolation Systems, 2017).....	16
Figura 9. Sistema elástico de un grado de libertad	17
Figura 10. Proceso de un sistema de adquisición (National Instruments, 2017).	18
Figura 11. Diagrama de estabilización.....	29
Figura 12. Laboratorio de Estructuras.	31
Figura 13. Caja de adquisición y sensores.	32
Figura 14. Equipo de adquisición instalado en el laboratorio de estructuras.....	32
Figura 15. Registro de vibraciones acelerómetros en la base de la estructura.....	33
Figura 16. Duración registros.	34
Figura 17. Energía espectral	34
Figura 18. Registros sismicidad (Red Sismológica Nacional de Colombia, 2016).....	35
Figura 19. Registro coincidente con la Red Sismológica Nacional de Colombia	36
Figura 20. Gráfico de estabilización registros Coincidentes	37
Figura 21. Gráfico de estabilización registros No Coincidentes.....	37
Figura 22. Puente grúa, Laboratorio de estructuras.	38
Figura 23 . Pórtico sobre aisladores de neopreno.	39
Figura 24. Pórtico sobre cimentación tradicional.	40
Figura 25. Funciones de transferencia para Registros Coincidentes	41
Figura 26. Funciones de transferencia para Registros No Coincidentes	42
Figura 27. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Rígido Registros Coincidentes	43
Figura 28. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Aislado Registros Coincidentes	43
Figura 29. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Rígido Registros No Coincidentes	44
Figura 30. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Aislado Registros No Coincidentes.	45
Figura 31. Aislador de neopreno en la base del pórtico.....	46

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL LABORATORIO DE ESTRUCTURAS DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

AUTOR(ES): GRECIA SANGUINO CAMACHO

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): GUSTAVO ANDRÉS OSPINA IDÁRRAGA

RESUMEN

El proyecto consiste en el monitoreo permanente del laboratorio de Estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana a través del sistema de monitoreo que consta de cajas de adquisición y sensores sísmicos para capturar la actividad sísmica de la edificación con el uso del software Signal Express; una vez recolectada esta información se realiza el procesamiento de esta por medio de metodologías de identificación modal usando el programa Matlab; aplicando la metodología ERA se determinan las características dinámicas experimentales de la estructura. A través del modelamiento del laboratorio de estructuras en el programa SAP2000 se obtienen los valores teóricos del comportamiento dinámico lo que permitirá determinar la exactitud de los datos recolectados. Teniendo en cuenta que el laboratorio consta de dos estructuras aperticadas gemelas, una de ellas cimentada sobre aisladores de neopreno, y la segunda sobre cimentaciones convencionales se busca verificar la efectividad en la disipación de energía de los aislantes de neopreno.

PALABRAS CLAVES:

Sismicidad, metodologías de identificación, aislamiento sísmico, identificación de sistemas

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE STRUCTURAL RESPONSE OF THE LABORATORY OF STRUCTURES OF THE PONTIFICIA BOLIVARIANA UNIVERSITY

AUTHOR(S): GRECIA SANGUINO CAMACHO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: GUSTAVO ANDRÉS OSPINA IDÁRRAGA

ABSTRACT

The project consists in the permanent monitoring of the Laboratory of Structures of the Pontificia Bolivariana University through the monitoring system that consists of acquisition boxes and seismic sensors to capture the seismic activity of the building with the use of Signal Express software; Once this information is collected, it's processed through modal identification methodologies using Matlab; the experimental dynamic characteristics of the structure is determined by ERA methodology . Through the modeling of the structure laboratory in SAP2000, the theoretical values of the dynamic behavior are obtained, which will allow to determine the accuracy of the collected data. Taking into account that the laboratory consists of two twin reinforced structures, one of them cemented on neoprene isolators, and the second on conventional foundations, it is sought to verify the effectiveness in the dissipation of energy of the neoprene isolators.

KEYWORDS:

Seismicity, identification methodologies, seismic isolation, system identification

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La alta sismicidad del nido sísmico de Bucaramanga, locación geográfica compartida por la Universidad Pontificia Bolivariana, provee un insumo para la investigación en ingeniería sísmica altamente aprovechable; a través de la instrumentación, monitoreo y procesamiento constante de las vibraciones ambientales del laboratorio de estructuras se realizará el análisis de la respuesta estructural en dos pórticos uno apoyado en cimentación tradicional y otro sobre aisladores de neopreno permitiendo determinar la eficiencia de los sistemas de aislamiento sísmico, además se realizará el modelamiento de las edificaciones en el programa Sap2000 con lo cual se pretende comparar los resultados de los modelos teóricos con los datos adquiridos de forma experimental.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Analizar la información capturada por el sistema de monitoreo permanente del laboratorio de Estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana

Objetivos Específicos

- Configurar adecuadamente el sistema de monitoreo instalado en el laboratorio de estructuras UPB para obtener una adquisición permanente de datos.
- Realizar el procesamiento de información capturado por el sistema de monitoreo a través de la metodología para la identificación de sistemas en los registros de aceleración ERA.
- Modelar las estructuras aporticadas gemelas teniendo en cuenta sus características de aislamiento particulares en el programa SAP2000.
- Comparar los resultados experimentales obtenidos de la metodología ERA con los resultados teóricos generados por el modelo para así determinar la eficiencia de los aisladores de neopreno.

CAPÍTULO 1

REFERENTE TEÓRICO

Historia de los sismos

Partiendo de la concepción de que los eventos sísmicos son resultado de la liberación de energía acumulada entre placas tectónicas, hace referencia Bergoeing (2009) basado en la teoría publicada por el astrónomo Alfred Wegener “Génesis de los continentes y océanos” se revolucionó el concepto de enfriamiento de la corteza terrestre permitiendo determinar que la corteza estaba dividida en placas tectónicas en constante movimiento, esta teoría llamada “Teoría de la tectónica de placas” clasifica las fracturas en la corteza en zonas, la primera es la zona de acreción (dorsales) donde las placas tectónicas son divergentes y donde se genera un vacío que se llena de magma ascendiendo, un ejemplo es el gran Rift africano; la segunda zona es de deslizamientos por fallas transformantes donde las placas se deslizan en sentidos opuestos, los esfuerzos acumulados entre placas liberan energía que genera sismos de gran magnitud; la tercera zona es la de subducción donde las placas tectónicas colisionan continuamente donde una placa se subduce creando una superficie inclinada de 40 a 60° con profundidades de hasta 700 Km generando ascendencia y reservorios magmáticos en la corteza terrestre a una profundidad de 8 a 10 Km; lo anterior produce distintos tipos de vulcanismo, una característica particular es que se encuentran localizados en zonas de subducción como los puntos calientes.

Para el caso de América central la tectónica está controlada por el choque de las placas del Coco que se subduce por debajo de la placa del Caribe a lo largo de la Fosa Mesoamericana con una velocidad de 70 mm por año; dando paso a movimientos sísmicos causados por los esfuerzos acumulados y el ajuste e interacción de las placas tectónicas generando la propagación de ondas sísmicas primarias y secundarias; un ejemplo es el sismo registrado en la costa de Chile el 27 de Febrero de 2010 con una magnitud de 8.8 en escala Mw el cual fue generado por la solapadura entre las placas tectónicas de Nazca y Suramericana (CEPAL,2010).

En el caso de Colombia la micro-placa Bloque de Panamá y su interacción con la placa caribe crearon una zona difusa de constante fallamiento generando sismos de gran magnitud por efectos de subducción. (Bergoeing, 2009) Colombia se halla localizada en una de las zonas de mayor sismicidad del planeta, donde confluyen la placa de Nazca, la placa Sudamericana y la placa del Caribe (Figura 1).

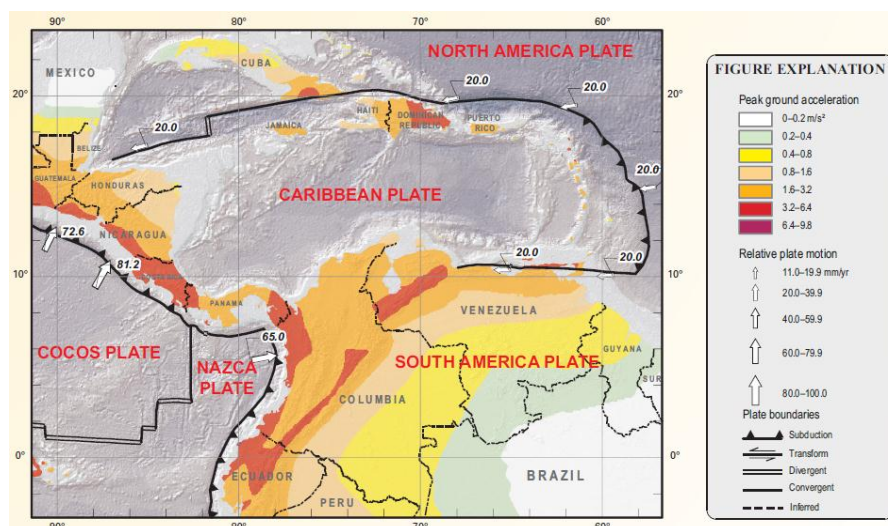


Figura 1. Riesgo sísmico y movimiento relativo de placas (USGS, 2011)

Bucaramanga y las ciudades del Área Metropolitana se encuentran circundantes al denominado Nido Sísmico de Bucaramanga el cual es catalogado como el segundo en actividad permanente en el mundo, zona de confluencia de las placas de Suramérica y del Caribe y que presentan una alta recurrencia de sismos de gran profundidad y baja magnitud.

Esta zona de alta sismicidad tiene su origen a profundidades mayores a los 120 kilómetros, los eventos sísmicos que se generan en el nido sísmico están concentrados en un área de 91 kilómetros cuadrados (visto en planta) con 10% de áreas de fallas acumuladas. Las esferas focales corresponden a fallas normales ya que el buzamiento del plano está en el rango de 0 a 90 grados y en su mayoría corresponden a fallas laterales izquierdas donde esta acumulada la mayor cantidad de energía que se libera en forma de sismos dando paso a fallas laterales derechas y generando ciclos de acumulación (Perico M. & Perico G., 2014).

Características de los sismos

Las deformaciones generadas por los eventos sísmicos son uno de los sucesos más críticos que pueden actuar sobre cualquier estructura, es por esta razón que resulta imprescindible el estudio y caracterización de estos fenómenos.

En la zona donde se presenta el movimiento o reajuste de las placas tectónicas se libera gran cantidad de energía cinética la cual atraviesa los diversos estratos del suelo sufriendo fenómenos de refracción y reflexión (teoría del rebote elástico) y

manifestándose en la superficie del terreno con movimientos fuertes con valores de aceleración variables y en un lapso de tiempo corto (Hurtado, 2000).

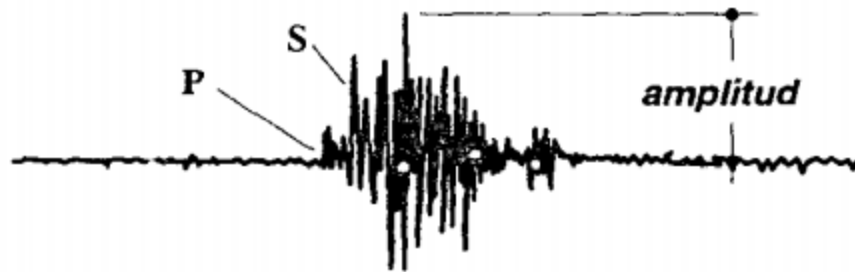


Figura 2. Sismograma (García, 1998)

Esta energía se manifiesta en ondas sísmicas las cuales pueden clasificarse en ondas de cuerpo y ondas de superficie (Figura 2); las ondas de cuerpo se generan en el punto de ruptura y se subdividen en ondas de dilatación (ondas primarias) con movimientos en el mismo sentido de propagación y ondas de cortante (ondas secundarias) con movimientos perpendiculares a las ondas de propagación; estas ondas se reflejan en la superficie y se subdividen en ondas de Rayleigh con movimientos circulares y ondas Love con movimientos horizontales transversales a las ondas de propagación. Los registros se toman con un sismógrafo el cual genera un sismograma (Figura 2) el cual grafica el tiempo y la aceleración que genera el sismo. Teniendo en cuenta que la magnitud de un sismo es una medida de la energía liberada por este, a mayor profundidad menor es la intensidad o magnitud de las ondas superficiales (García, 1998).

Normativa Colombiana para Construcción Sismo-resistente

El reglamento de construcción sismo resistente NSR 10 realizó la evaluación de la amenaza sísmica del país con el fin de poseer información detallada de la sismicidad de las regiones para determinar los parámetros de diseño y construcción, buscando reducir la afectación y vulnerabilidad de una población en constante aumento. A partir de la teoría sismológica clásica se determinaron las intensidades sísmicas teniendo como base la gran cantidad de registros sísmicos que se poseen en la actualidad a través de la Red sismológica colombiana creando un catálogo unificado con 7401 eventos con magnitud mayor o igual a 4.0; se escogieron 38 fuentes sismogénicas, 30 corticales con volúmenes con profundidades menores o iguales a 60 kilómetros y 8 profundas con profundidades mayores a 60 kilómetros, a través del modelo de sismicidad de Poisson calculando la tasa de excedencia de la magnitud umbral permitiendo calcular la sismicidad de cada zona, finalmente a través de la parametrización de las fuentes y las relaciones de atenuación de energía se puede calcular la amenaza sísmica en un lugar específico al integrar los efectos de las 38 fuentes sísmicas y la distancia entre el sitio de la evaluación y la fuente, dando como resultado mapas nacionales de aceleración máxima del terreno para distintos períodos de retorno, curvas de amenaza en términos de aceleración máxima del terreno y espectros de amenaza uniforme a nivel de roca firme permitiendo tener información actualizada para el estudio del comportamiento y diseño estructural (Salgado, Bernal & Yamin , 2010).

La normativa colombiana tiene como objetivo para el diseño sísmico reducir al mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas y proteger el patrimonio de los ciudadanos y del

estado, aparte de resistir las cargas propias del uso de la estructura estipuló tres estados; el estado límite de servicio debe resistir sismos de baja intensidad sin generar daños en la estructura, el estado límite de integridad estructural debe resistir sismos moderados sin daños estructurales con algunos daños en los elementos y finalmente el estado límite de supervivencia debe resistir sismos de gran intensidad con daños estructurales pero sin colapso (Retamoso, 2004).

Debido al alto riesgo sísmico presente en el territorio colombiano la normativa de diseño y construcción sismorresistente restringió la flexibilidad de las estructuras, permitiéndoles una deformación lateral relativa de entrepiso máxima de 1% (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), y estableció espectros de diseño que relacionan el periodo de vibración esperado de la estructura con la aceleración máxima esperada del suelo:

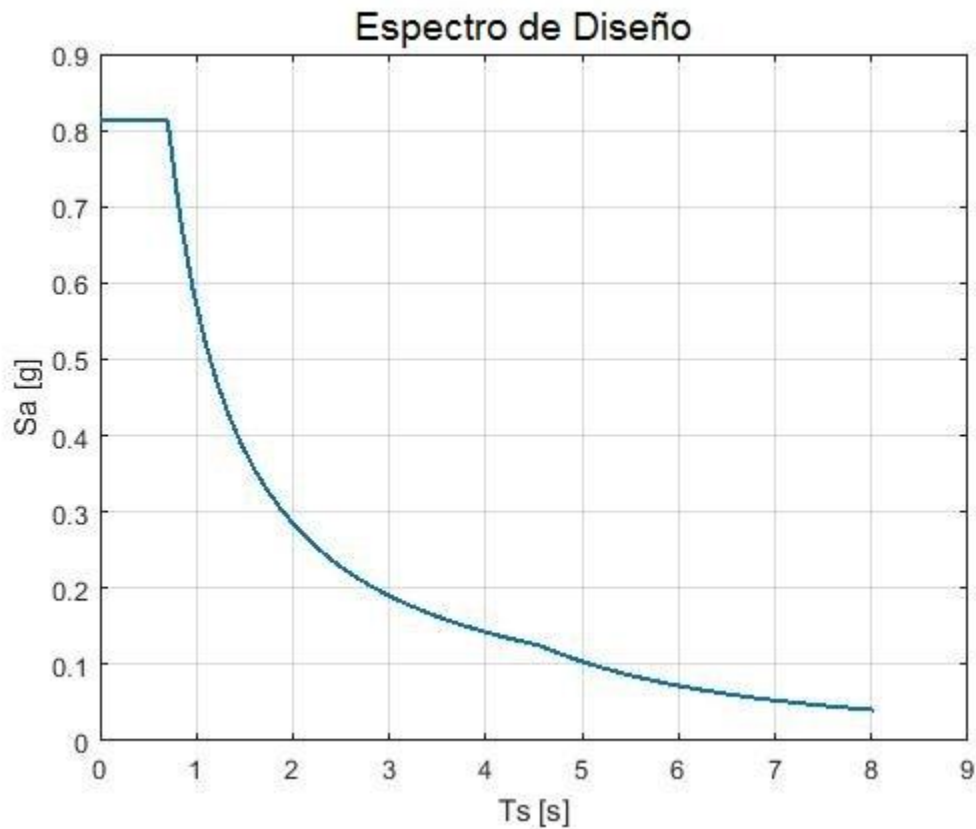


Figura 3. Espectro de diseño Bucaramanga

Este espectro es un parámetro de referencia para el diseño estructural limitándolo a no tener deformaciones inelásticas significativas, al mismo tiempo permite realizar la reducción de las fuerzas que actúan en el sistema con el coeficiente de disipación de energía R el cual depende de las características particulares de disipación de la estructura, lo anterior en conjunto con la mayoración de cargas establecidas en la normativa permite realizar la evaluación del comportamiento de los diferentes elementos estructurales (Retamoso, 2004).

Propiedades Dinámicas

En el diseño de estructuras sismo resistentes es fundamental conocer el comportamiento dinámico de la estructura, se requiere información precisa de las propiedades de la edificación como su masa, rigidez, frecuencia natural, entre otras; lo anterior enfocado a determinar su capacidad de disipación de energía y la respuesta del sistema ante fuerzas externas, específicamente sísmicas.

Periodo y frecuencia natural

La literatura de referencia para la dinámica estructural (Chopra, 1995; Garcia, 1998) describe la frecuencia natural de vibración de un sistema estructural como:

$$f_n = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi} \quad \text{Ecuación (1)}$$

La $f_n = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi}$ Ecuación (1) indica cuantas veces oscila el sistema estructural por segundo (Hertz) dadas sus propiedades de masa y rigidez. El periodo natural de vibración se calcula como el inverso de la frecuencia natural:

$$T_n = \frac{1}{f_n} \quad \text{Ecuación (2)}$$

La $T_n = \frac{1}{f_n}$ Ecuación (2) describe el tiempo que tarda el sistema estructural en completar un ciclo de vibración.

Rigidez

Partiendo de que todo cuerpo que se encuentra sometido a fuerzas tanto estáticas como dinámicas sufre deformaciones, se puede definir la rigidez como la fuerza necesaria para generar en el cuerpo una deformación unitaria en el mismo sentido y dirección de dicha carga; esta propiedad dinámica relaciona las fuerzas externas aplicadas con las deformaciones del sistema (García, 1998).

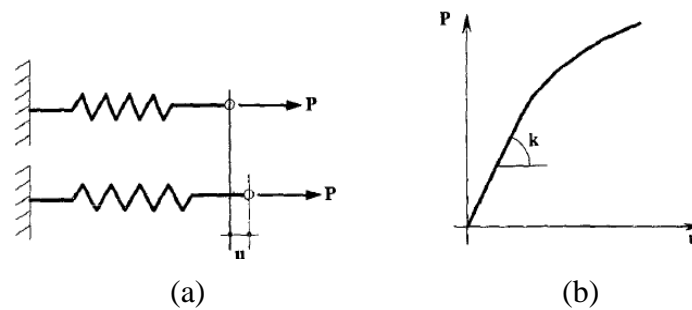


Figura 4. Relación fuerza-desplazamiento para un resorte (García, 1998).

Si se toma como ejemplo un resorte con uno de sus extremos libres (4-a) y se aplica una fuerza de magnitud P , internamente están trabajando fuerzas en el resorte que tratan de resistir la deformación u (4-b), esta relación representa la rigidez k y puede expresarse como:

$$k = \frac{P}{u} \quad \text{Ecuación (3)}$$

La Figura 4 (b) relaciona el esfuerzo y la deformación de un material en su rango lineal, obteniendo el valor del módulo de elasticidad E como la pendiente de esta:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Este valor refleja la rigidez la cual es una característica fundamental de toda estructura, es por esto que podría llamarse módulo de rigidez (Pytel & Singer, 1994).

Amortiguamiento

El movimiento de un cuerpo tiende a disminuir en el tiempo, esto se debe hay una pérdida de energía en el sistema la cual se atribuye a las fuerzas de amortiguamiento características; esta reducción de energía se puede explicar cómo la transformación de la misma, pasando de energía cinética a calor o sonido. En el caso particular de una edificación esta propiedad es la encargada de disipar la energía sísmica absorbida por el sistema (García, 1998).

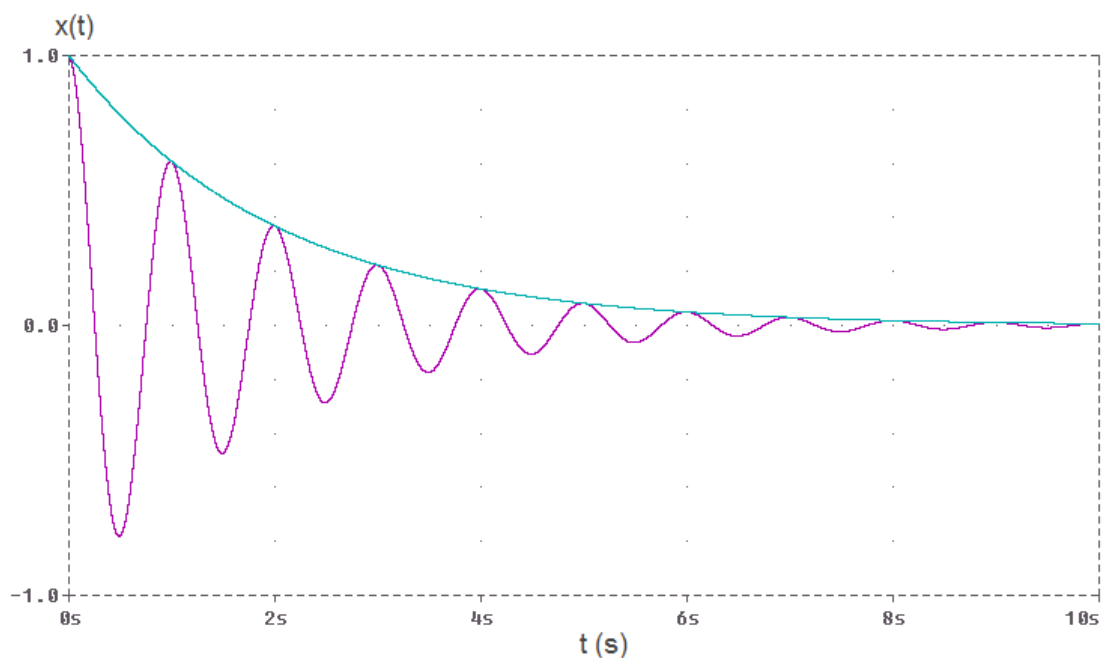


Figura 5. Vibración libre amortiguada (PCP, 2017)

Es fundamental tener presente que las propiedades particulares de la estructura hacen que vibre y se desplace de forma diferente al movimiento del terreno, es decir, las fuerzas que actúan en la edificación dependen de sus características y son proporcionales a su masa; es por esto que los desplazamientos del suelo se amplifican en la estructura debido a la vibración de la estructura y este grado de amplificación depende de la relación entre el periodo propio de la edificación y del suelo como también de su amortiguamiento (Retamoso, 2004).

Aislamiento Sísmico

Con el fin de garantizar estructuras seguras y que cumplan con los requisitos de las normativas sismo resistentes, en los últimos años ha aumentado la implementación del aislamiento de base; estos sistemas funcionan efectivamente en edificaciones de baja altura y relativamente rígidas; su principal objetivo es el de absorber una porción importante de la energía sísmica lo que reduce la demanda de disipación de energía por ductilidad en los miembros estructurales principales minimizando la probabilidad de daño estructural, degradación de resistencia y lo más importante, la pérdida de vidas humanas. (Mayorga, 2011). Esta técnica ha sido utilizada en gran cantidad de estructuras con niveles altos de importancia y en la rehabilitación de edificaciones, esto no solo se atribuye a la disminución de daños estructurales sino también a la reducción de costos en el proceso constructivo.



Figura 6. Estructura sin aislamiento sísmico y con aislamiento sísmico (Aisladores, 2015)

Esta técnica de aislamiento sísmico consiste en la utilización de conexiones con características especiales ubicadas entre la cimentación y la estructura con el fin de desacoplar los movimientos de la edificación del desplazamiento del suelo frente a un evento sísmico (Figura 6); estas conexiones pueden ser un plano deslizante con baja fricción o un elemento flexible, el más común, de neopreno.



Figura 7. Aislador de Neopreno.(James M., 2013)

El objetivo es reducir la excitación de la edificación frente a un evento aleatorio, para el caso de apoyos deslizantes esto se lleva a cabo a través de la reducción en el coeficiente de fricción, mientras que en el caso de aisladores de neopreno (Figura 7) se realiza modificando las propiedades dinámicas de la estructura (Rotondo & Barbat, 1999), estos sistemas agregan una capa de baja rigidez entre el suelo y la estructura generando que el periodo fundamental de esta aumente, lo anterior permite la reducción en la aceleración y fuerzas inducidas por el sismo a la edificación (Chopra, 1995).

Los aisladores de neopreno son sometidos a diversas pruebas para determinar su capacidad máxima de desplazamiento basados en los límites de diseño del 250% de resistencia al cortante del neopreno o $2/3$ su diámetro. Se aplican fuerzas cortantes y axiales para caracterizar el comportamiento del aislador en un rango de esfuerzos que pueden llegar a ser mayores al 300% de su capacidad. Estos resultados se grafican en la curva de histéresis (Figura 8) la cual permite extraer valores de rigidez elástica o inicial (k_e), rigidez de cedencia (k_2) la cual depende de su módulo, peso y área, rigidez efectiva (K_{eff}) la cual se divide por el desplazamiento, fuerza de histéresis (Q_d) la cual relaciona la respuesta y el amortiguamiento del aislador frente a cargas de servicio, la energía disipada por ciclo (EDC) y demás características particulares de cada aislador (Dynamic Isolation Systems, 2017).

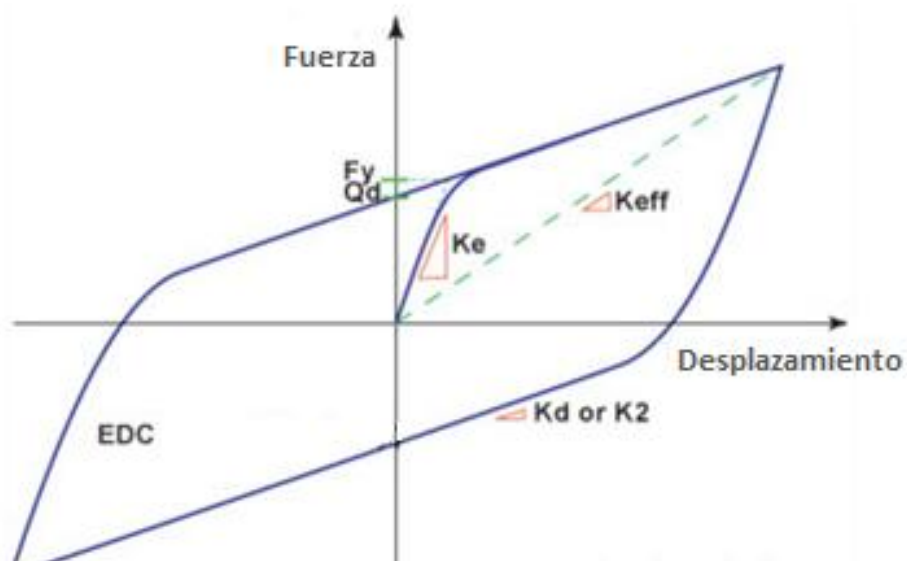


Figura 8. Curva de histéresis aislador de Neopreno. (Dynamic Isolation Systems, 2017)

Sistemas de un grado de libertad

Se entiende por grados de libertad de un sistema o estructura aquellos desplazamientos que identifican su posición deformada a lo largo del tiempo. Para el caso particular de edificaciones los modelos dinámicos se basan en el método de las masas concentradas (Chopra, 1995) teniendo en cuenta que en la realidad la masa de un edificio se encuentra concentrada en zonas de la estructura que se identifican con facilidad; se modela la estructura continua como un sistema discreto de masas concentradas con el efecto de las fuerzas de inercia reales conectadas por resortes, entonces el número de grados de libertad de un sistema es equivalente al número de componentes de desplazamiento según los cuales las masas concentradas vibran (Rotondo & Barbat, 1999).

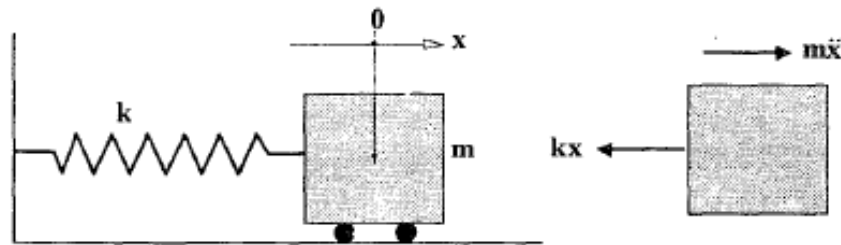


Figura 9. Sistema elástico de un grado de libertad

El sistema a considerar se observa en la Figura 9, consta de una masa indeformable m , un resorte sin masa de constante k y un amortiguador viscoso con constante de proporcionalidad c que se mueve con una velocidad proporcional a la fuerza aplicada en este; puede decirse que es la idealización de una estructura de un nivel ya que representa las propiedades que cada miembro estructural aporta a la edificación como lo son la inercia, elasticidad y su energía de disipación (Chopra, 1995). Para que este sistema sea lineal los valores de m , k y c deben ser constantes y no depender de la variable X , debe tenerse en cuenta que este sistema queda únicamente definido por la coordenada X .

Sistemas de Adquisición

Los sistemas de adquisición de datos son utilizados para el registro y medición de diversos tipos de señales, puede realizarse de forma directa como en la medición de frecuencias, voltajes y resistencias; si hablamos de la adquisición de datos DAQ este proceso se utiliza en conjunto con una computadora permitiendo almacenar la información del fenómeno eléctrico o físico (voltaje, temperatura, presión); estos

sistemas son usados frecuentemente en controles de calidad, estudios ambientales y en el ámbito investigativo.

Un sistema de adquisición DAQ está compuesto por sensores, cajas de adquisición, hardware de medidas DAQ, computadora y un software particular para el registro y almacenamiento de las señales; al usar medios digitales se obtienen medidas con mejor visualización y potencia, siendo más flexible y rentable (Bartholomew, 1963).



Figura 10. Proceso de un sistema de adquisición (National Instruments, 2017).

Sensores

Los sensores, también conocidos como transductores permiten realizar la medición de un fenómeno físico como la presión, temperatura o intensidad de la luz en una diferencia de potencial, variación de intensidad o una señal eléctrica, es decir, convierten la energía en información tangible que caracteriza el comportamiento del fenómeno; pueden tener diversas salidas eléctricas como la corriente, el voltaje o resistencia variables en el tiempo (Bartholomew, 1963).

Tarjetas de adquisición

Las tarjetas de adquisición de datos permiten la conversión de las señales externas de analógicas a digitales y posteriormente sirve como canal de comunicación con el computador; entre las características más relevantes están el número de canales analógicos, la velocidad de muestreo, la resolución, el rango de entrada, la capacidad de temporización y la conexión con el ordenador; estas propiedades varían según el fenómeno y el propósito del estudio a realizar (Bartholomew, 1963).

Dispositivo DAQ

El hardware DAQ es un dispositivo que digitaliza las señales externas analógicas para que puedan ser interpretadas a través del computador; está compuesto por el circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico-digital y el bus de la PC (National Instruments, 2017).

Acondicionamiento de Señales

Debido a la naturaleza de las señales en el exterior puede resultar peligroso realizar mediciones directas, por esta razón se utiliza el acondicionamiento de señales para generar datos seguros de interpretar y puede realizarse a través de la amplificación, atenuación, filtrado, linealización o aislamiento, todo depende el tipo de fenómeno a estudiar y los sensores (National Instruments, 2017).

Convertidor Analógico Digital (ADC)

Una vez recolectadas las señales analógicas por medio de los sensores es necesario convertirlas a modo digital para poder ser manipuladas en un computador, este proceso se realiza con la ayuda de un chip el cual genera una representación digital de la señal previamente registrada en un instante de tiempo (National Instruments, 2017).

Computadora

En el proceso de adquisición de datos es fundamental tener un computador con un software programable que permita la visualización y control del comportamiento y operación del dispositivo DAQ para realizar correctamente el procesamiento y almacenamiento de las señales medidas (National Instruments, 2017).

Software Controlador

Este tipo de software es la interfaz que interactúa con el dispositivo DAQ, permitiendo simplificar la comunicación y adquirir los comandos de hardware de bajo nivel y programación a nivel de registros (National Instruments, 2017).

Software de Aplicación

Este tipo de software es la interfaz que permite la interacción entre el usuario y el computador para visualizar, almacenar, analizar y presentar las medidas de las señales, actualmente existen diversos programas que permiten la manipulación de la información

de forma predefinida o personalizada con el fin de automatizar las diversas funciones del dispositivo DAQ con la aplicación de algoritmos de procesamiento de señales (National Instruments, 2017).

Labview – signal express

Es un software interactivo que no necesita programación el cual permite adquirir, almacenar y analizar datos de forma rápida como también realizar reportes personalizados a través de diversos dispositivos de adquisición de datos modulares y autónomos; en su configuración es posible controlar instrumentos, realizar análisis del dominio de frecuencias, tiempo y matemáticas básicas, importar información, configurar restricciones y eventos y generar alarmas (National Instruments, 2014).

Metodologías de identificación

En ingeniería estructural las metodologías de identificación modal se utilizan para determinar el comportamiento dinámico de diversos sistemas, estos parámetros son cruciales en el estudio del comportamiento dinámico de edificaciones como también han sido aplicadas en el monitoreo de salud estructural y la verificación de diseños.

Las metodologías para la identificación de propiedades dinámicas usualmente se adaptan a las condiciones de carga ambiental (viento, tráfico vehicular, etc.) puesto que son este tipo de cargas las que usualmente mantienen las estructuras en constante vibración. Estas metodologías presentan dos grandes ventajas en comparación con los métodos de análisis

tradicional: i) no requieren costosos y pesados equipos para simular excitación y ii) todos los registros pueden ser usados como referencia y pueden aplicarse diversos métodos de análisis modal (Tamura, 2002). Las vibraciones ambientales, dada su condición de “carga de servicio”, permiten monitorear el sistema estructural dentro de sus rangos de linealidad, y se consideran invariantes en el tiempo (Farrar & James, 1997), por lo que es posible inferir cambios estructurales a partir de cambios observados en las propiedades dinámicas durante el periodo de monitoreo.

NExT-ERA

Una de las metodologías de común uso para la identificación de propiedades dinámicas a partir de vibración ambiental es la metodología NExT (Natural Excitation Technique), la cual fue desarrollada para el análisis de vibraciones en estructuras bajo cargas ambientales (James, Carne & Lauffer, 1995). La técnica se basa en el hecho de que la correlación que existe entre los datos de vibración ambiental entre diferentes canales monitoreados es análoga a la ecuación de movimiento del sistema estructural sometido a vibración libre, y por tanto, es posible obtener la respuesta impulsiva de cada canal monitoreado, usando uno de ellos como canal de referencia (Caicedo, 2010).

La segunda metodología en consideración es ERA (Eigensystem Realization Algorithm). ERA es un algoritmo para la identificación de sistemas (Ogata, 2010), el cual requiere la respuesta impulsiva del sistema estructural analizado para obtener parámetros dinámicos estructurales (Caicedo, 2010).

En el proceso de identificación aplicando la metodología ERA son importantes los parámetros como el número de puntos usados en la transformada de Fourier (FFTs) y los valores de frecuencia del sistema, ya que con estos datos se obtiene el modelo numérico del sistema bajo vibraciones ambientales; las dimensiones de la matriz de Hankel y los modos de vibración esperados varían los resultados obtenidos en la identificación del sistema; finalmente se obtienen valores de frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento.

El análisis realizado aplicando Fourier, también conocido como análisis armónico, de una serie de datos en el tiempo consiste en la descomposición de los estos registros en la suma de componentes sinusoidales y los coeficientes obtenidos se conocen como la transformada de Fourier, permitiendo analizar cualquier procedimiento de recolección de datos que mida o describa las fluctuaciones en un periodo de tiempo comparándolas con funciones sinusoidales (Blommfield, 2000).

La metodología ERA (Eigensystem Realization Algorithm) basado en un sistema discreto (Ecuación (7) y a través de la respuesta de la estructura calcula las matrices A, B, C, D del sistema las cuales describen la relación entre señales de entrada y salida de la estructura, específicamente aquella con menor número de estados, lo anterior se conoce como principio de realización mínima (Caicedo, 2010).

Los pares de conjugadas complejas (polos) se calculan a través de los valores de la matriz A , cada uno corresponde a un modo de vibración y permite hallar valores de frecuencias naturales y amortiguamiento.

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad \text{Ecuación (6)}$$

- $x(k)$ vector de estados
- $u(k)$ vector de entradas del sistema
- $y(k)$ vector de salidas del sistema
- A, B, C, D matrices en tiempo discreto de estado estable.

Los pares de conjugadas complejas (polos) se calculan a través de los valores de la matriz A , cada uno corresponde a un modo de vibración y permite hallar valores de frecuencias naturales y amortiguamiento. Los parámetros modales son obtenidos de las matrices A y C , con los datos anteriores se aplica ERA (Caicedo, 2010).

Es común usar el algoritmo en conjunto con la técnica de excitación natural (NexT), pero en casos particulares se puede prescindir de esta ya que existen gran variedad de programas los cuales permiten determinar el poder de la densidad espectral necesaria para calcular la función de correlación ejecutando el método de Welch (Caicedo, 2010).

La función de correlación puede determinarse con el método de Welch aplicando la transformada de Fourier (FFTs) para la cual es necesario calcular funciones de densidad espectral; estos cálculos pueden obtenerse fácilmente con diversos programas

matemáticos, en particular Matlab (Caicedo, 2010). Para este método se debe seleccionar un canal de entrada de referencia, teniendo los datos, se dividen los registros en bloques y se calcula el promedio del cuadrado de las magnitudes del espectro de la transformada de Fourier para calcular el poder de la densidad espectral; deben estimarse para cada bloque la magnitud, el número de puntos de transformada de Fourier y el número de puntos que se superponen; debe tenerse en cuenta que el número de puntos obtenido de la función de correlación cruzada es igual al número de puntos usados en la transformada de Fourier y que su frecuencia de muestreo es igual a la frecuencia de muestreo de los registros (Caicedo, 2010).

Energía Espectral

El concepto de energía de la señal es aplicado sobre el dominio de frecuencias de la señal, de modo que se pueda caracterizar la densidad de energía de la señal en su determinado espectro.

$$E_x = \sum |x|^2 \text{ Ecuación (7)}$$

$$E_X = \sum |X(f)|^2 \text{ Ecuación (8)}$$

Existen parámetros fundamentales para la correcta implementación de NExT los cuales son el número de puntos en la transformada de Fourier y el canal de referencia con los cuales se calculará la función de correlación cruzada, para implementar ERA es necesario determinar el número de filas y columnas de la matriz de Hankel y el número de polos a identificar; es importante resaltar que los valores de amplitud y frecuencia de muestreo en

el dominio del tiempo de los datos afectan los resultados de la metodología. Finalmente cuando se asignan estos parámetros para la estructura a estudiar se pueden realizar diversos análisis con pequeños o ninguna variación (Caicedo, 2010)..

Selección de datos

Es fundamental comprender las características de los datos monitoreados, su frecuencia de muestreo, el ratio de señales de ruido y su estacionariedad, en este caso en particular se supone que existe una baja incidencia del ruidos sobre la señal (noise-to-signal ratio); la identificación modal puede realizarse con éxito aun cuando los registros no son totalmente estacionarios pero que posea un mínimo número de estos; se puede decir que un registro es estacionario cuando todos los posibles momentos no cambian con el tiempo, un ejemplo claro son los registros obtenidos en un puente en un periodo de trafico continuo y otro de trafico esporádico, entonces es posible descartar los valores no estacionarios. Es útil generar algunas funciones espectrales cruzadas con el fin de visualizar los picos que representan posibles frecuencias naturales (Caicedo, 2010).

Parámetros de la FFT

Los parámetros requeridos para definir la FFT (Fast Fourier Transform) son la frecuencia de muestreo, el número de puntos, la longitud de los registros y el canal de referencia; se debe calcular la función de correlación cruzada con gran exactitud, si se aplica la transformada de Fourier se deben considerar tres parámetros principales que son la

longitud de los registros, número de puntos de la FFT, la superposición y frecuencia de muestreo de los registros.

La longitud de los registros y el número de superposiciones entre bloques afecta la cantidad de promedios para la función de densidad espectral y debe analizarse en conjunto con el número de puntos utilizado en la transformada de Fourier. Es recomendable usar registros de mayor longitud para datos con niveles considerables de ruido, en cambio los registros pueden tener menores longitudes si los datos son claros; las estructuras con bajas frecuencias como los puentes atirantados requieren registros de mayor longitud para capturar el mismo número de ciclos en comparación con estructuras con altas frecuencias (Caicedo, 2010).

El rango de frecuencia donde se identifican los parámetros del sistema dependen de la frecuencia de muestreo, los registros con altas frecuencias de muestreo pueden disminuir el rendimiento en el proceso de identificación de bajos modos de frecuencia; por esta razón es aconsejable realizar varios muestreos para determinar un rango de frecuencias adecuado, en estos casos se usan filtros anti-aliasing, la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo el doble de la frecuencia más alta a analizar para cumplir con el criterio de Nyquist (Caicedo, 2010).

Para seleccionar el canal de referencia para NExT puede seleccionarse un canal de referencia con alta amplitud, una baja incidencia de ruidos sobre la señal y que se

encuentre alejado del nodo de vibración de los modos a analizar; al usar señales obtenidas a través de sensores cercas al nodo de vibración se puede hacer más complejo la identificación modal; esta la alternativa de realizar identificación modal varias veces con canales de referencia diferentes en cada toma lo que generará un diagrama similar al de estabilización (Caicedo, 2010).

Filas y Columnas de la matriz de Hankel

La cantidad de filas y columnas de la matriz dependen del número posible de frecuencias naturales del sistema; si se tiene conocimiento previo o un modelo numérico del sistema se puede hacer una aproximación de la cantidad de frecuencias naturales basados en el modelo numérico preliminar, de lo contrario puede estimarse con los valores más altos de la función de densidad espectral cruzada. El propósito es usar la mayor cantidad de información de la función de densidad espectral sin incluir ruido el cual se encuentra al final de la función de correlación cruzada (Caicedo, 2010).

Se debe tener presente que el número de columnas es cuatro veces el número de modos estimados; se debe utilizar la mayor cantidad de información de la función de densidad espectral cruzada evitando las señales de ruido que se encuentra al final de la correlación cruzada, es decir, se deben tomar pocos ciclos de vibración para garantizar una correcta identificación; es por esto que el registro de correlación cruzada debe ser más largo para estructuras con valores bajos de frecuencia natural (Caicedo, 2010).

Diagramas de estabilización

Puede decirse que el paso más importante en la identificación modal es determinar el número correcto de polos (orden del modelo), si se tiene un orden de modelo muy alto pueden aparecer modos de vibración ficticios, si el orden del modelo es muy bajo pueden perderse datos de los parámetros modales. Los diagramas de estabilización (Figura 11) son una herramienta efectiva para determinar el número de polos correcto en la metodología ERA y esto lo realiza repitiendo el proceso de identificación con un número diferente de polos, los modos estables aparecen constantes en todas las iteraciones, diversos modos pueden identificarse seleccionando diferentes canales de NExT, lo cual permite la identificación modal como una mezcla de modos identificados con diferentes canales de referencia (Caicedo, 2010).

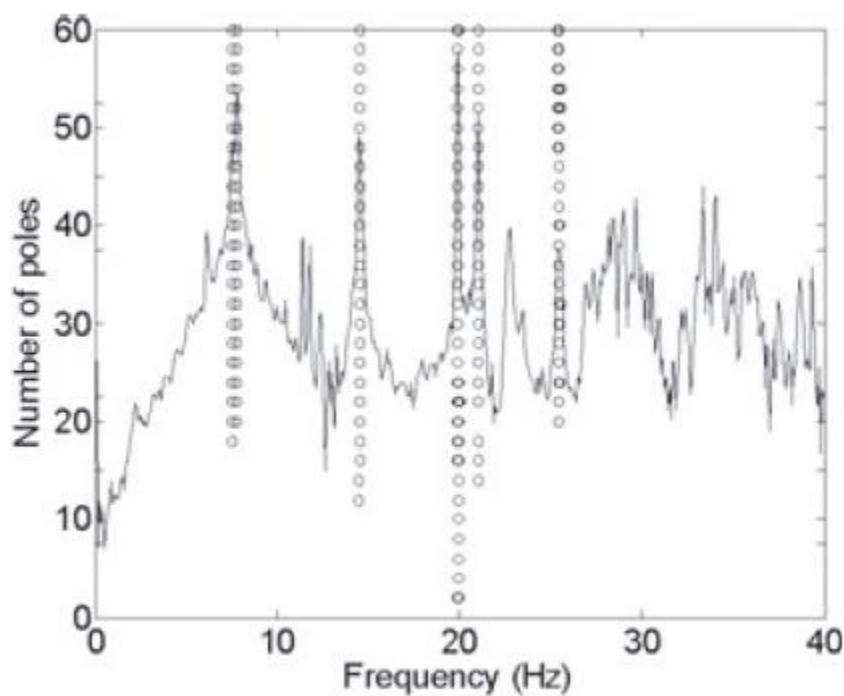


Figura 11. Diagrama de estabilización.

Función de transferencia

Las funciones de transferencia se utilizan para caracterizar la relación de los datos de entrada y de salida de un sistema obteniendo como resultado ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. Esta función se puede definir iniciando en el radio de la transformada de Laplace de la función de respuesta hasta la transformada de Laplace de la función de entrada partiendo de un punto inicial con valor cero (Ogata, 2010).

$$G(s) = \frac{L[salida]}{L[entrada]} \mid \text{condición inicial cero} \quad \text{Ecuación (9)}$$

La función de transferencia es un parámetro propio del sistema y es independiente de la magnitud o naturaleza de la función de entrada; si ya se conoce la función de transferencia de un sistema puede realizarse el estudio de la respuesta variando los valores de entrada para comprender su comportamiento, si no se conoce, puede hallarse experimentalmente con datos conocidos de entrada y analizando la función de salida; este método permite obtener información detallada de las propiedades dinámicas de un sistema (Ogata, 2010).

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

El laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana consiste en dos estructuras aporticadas gemelas, de las cuales una de ellas se halla cimentada sobre aisladores de neopreno, y la segunda estructura se encuentra apoyada sobre cimentaciones tradicional (zapatas). Estas características permiten estudiar la respuesta dinámica sobre estos sistemas gemelos alimentados por la sismicidad regional y registrados con el sistema de monitoreo continuo instalado en el laboratorio.



Figura 12. Laboratorio de Estructuras.

Implementación de sistema de monitoreo de vibraciones

En el laboratorio de estructuras se utilizaron tarjetas de adquisición y sensores para el monitoreo y registro de aceleraciones, estos se instalaron en las dos secciones del laboratorio, en la base de la estructura sin aislamiento de neopreno (señales de entrada), en una columna ubicada en cimentación superficial tradicional y una columna sobre aislamiento de neopreno (señales de salida).



Figura 13. Caja de adquisición y sensores.



Figura 14. Equipo de adquisición instalado en el laboratorio de estructuras.

Ajuste de parámetros y calibración de sistema de monitoreo continuo

Para el registro de datos de aceleración se utilizó el programa LabVIEW SignalExpress, el cual permite almacenar la información según los parámetros requeridos, en este caso en función de la amplitud de las vibraciones; además se establecieron triggers con el fin de evitar el consumo innecesario de la capacidad de almacenamiento en el computador central de monitoreo.

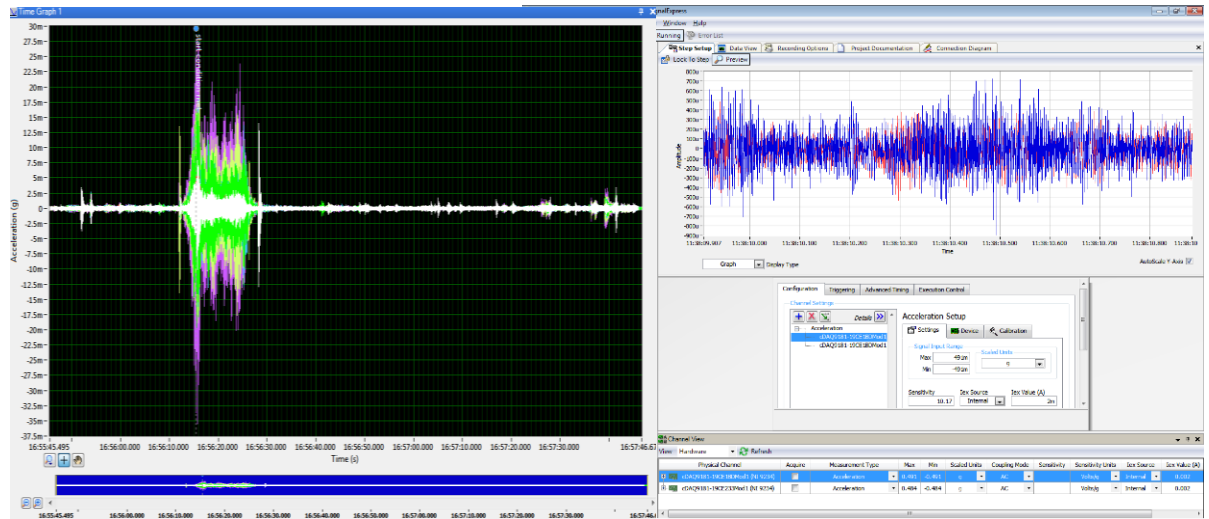


Figura 15. Registro de vibraciones acelerómetros en la base de la estructura.

Selección de datos y filtrado a través de la energía de las señales

El sistema de monitoreo está compuesto por siete sensores, tres sensores se encuentran ubicados en la base del laboratorio que está ubicada sobre la cimentación tradicional, adicionalmente se instalaron dos sensores en la parte alta del pórtico registrando en sentido X y Y, y dos en el pórtico ubicado sobre aisladores de neopreno registrando en sentido X y Y.

Se inicia asumiendo que debido a que las estructuras analizadas son pórticos simples los primeros dos modos de vibración son suficientes para determinar la respuesta estructural del sistema; se consideran las frecuencias mayores a 10 Hz como “ruido” generado por el uso de la estructura.

Se determinó un tiempo estándar de duración de los registros de 120 segundos teniendo en cuenta que es el tiempo con mayor cantidad de datos concentrados.

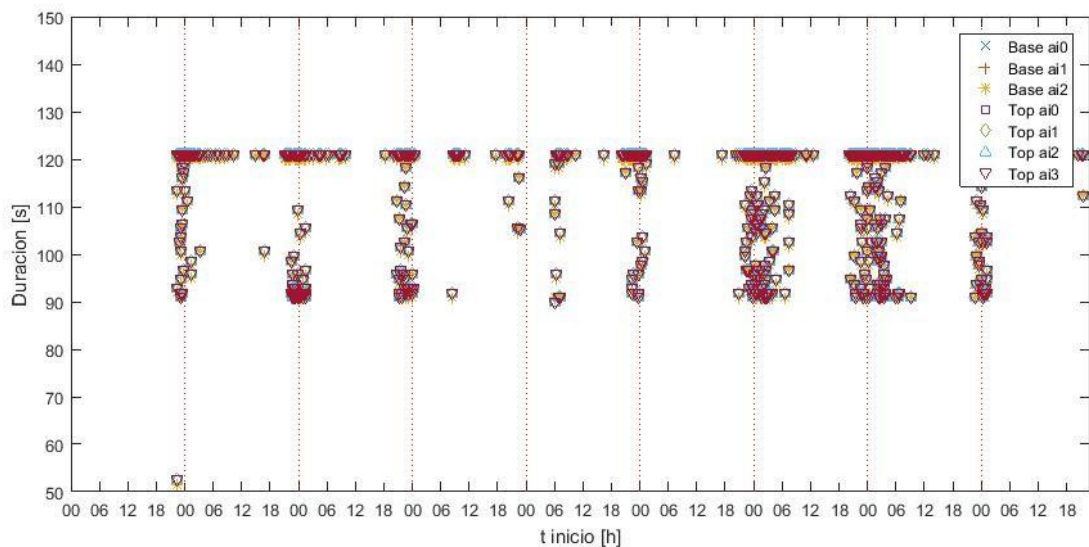


Figura 16. Duración registros.

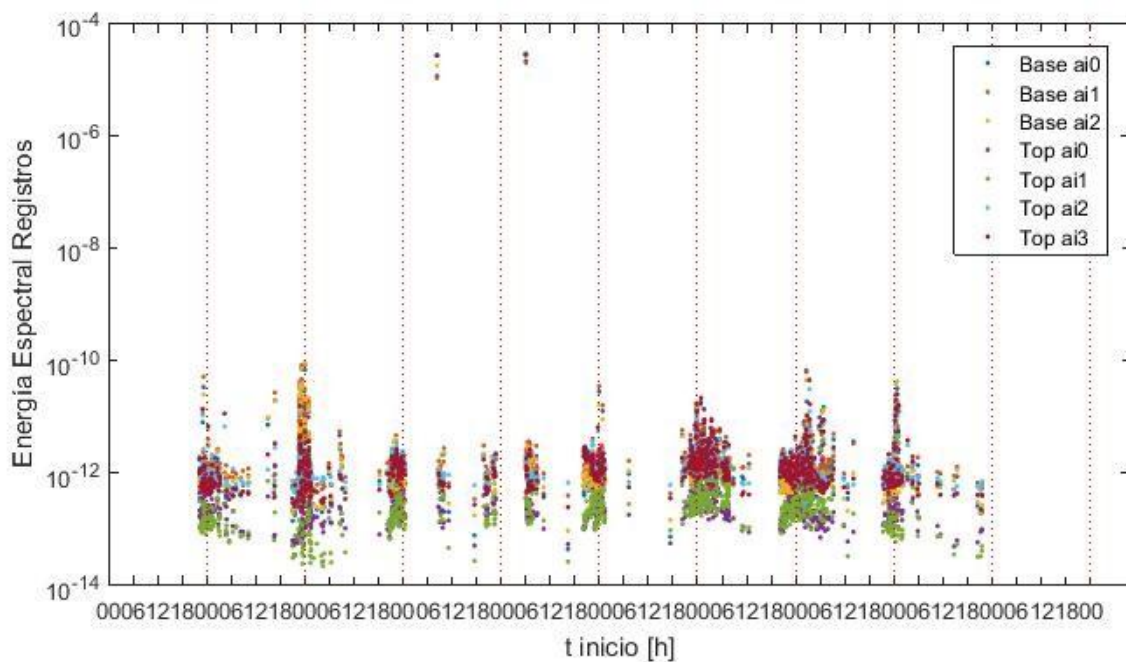


Figura 17. Energía espectral

Debido a la gran cantidad de datos almacenados por el sistema de monitoreo continuo y al uso normal del laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana se hace necesario clasificar los datos en vibraciones ambientales y vibraciones sísmicas; a través de la información suministrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia se seleccionan los datos que coinciden con eventos sísmicos cerca al nido sísmico de Bucaramanga.

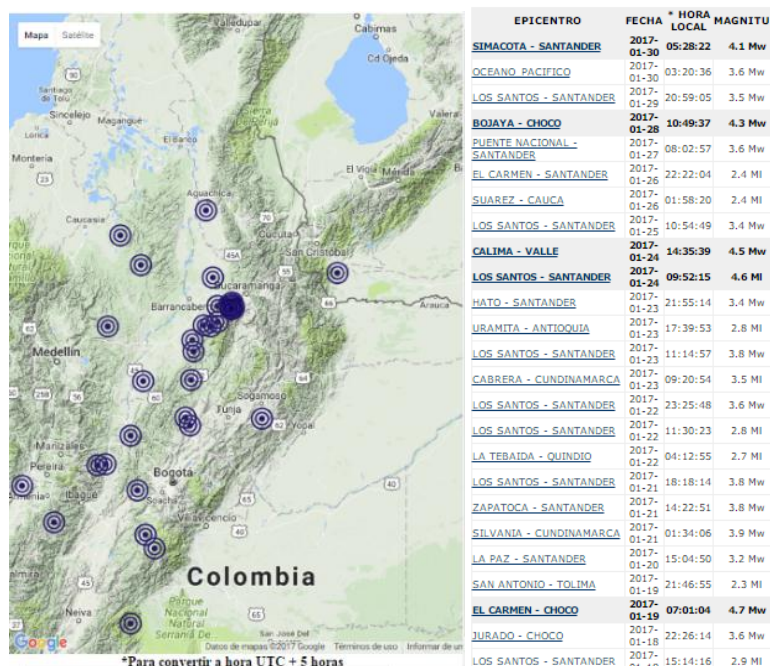


Figura 18. Registros sismicidad (Red Sismológica Nacional de Colombia, 2016)

Se obtuvieron 18 registros posiblemente cercanos a la información suministrada por la Red los cuales son seleccionados para el post procesamiento; los registros restantes permitirán determinar las propiedades dinámicas del sistema durante su uso normal en actividades de laboratorio.

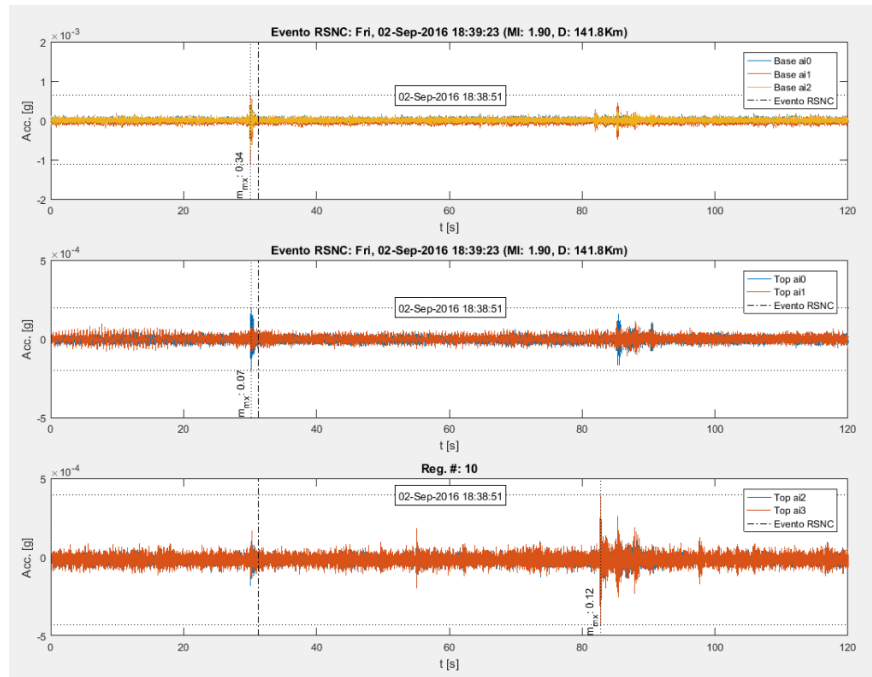


Figura 19. Registro coincidente con la Red Sismológica Nacional de Colombia

Análisis de información recolectada y post-procesamiento de información utilizando funciones de transferencia y la metodología ERA

Se generan diagramas de estabilización, para identificar la consistencia y determinar con mayor exactitud los valores de frecuencias identificadas de cada sistema y posteriormente determinar sus propiedades modales.

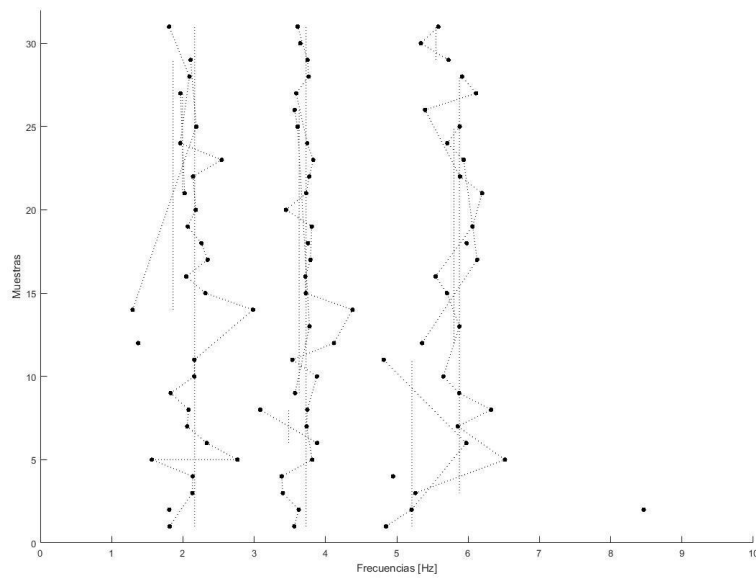


Figura 20. Gráfico de estabilización registros Coincidentes

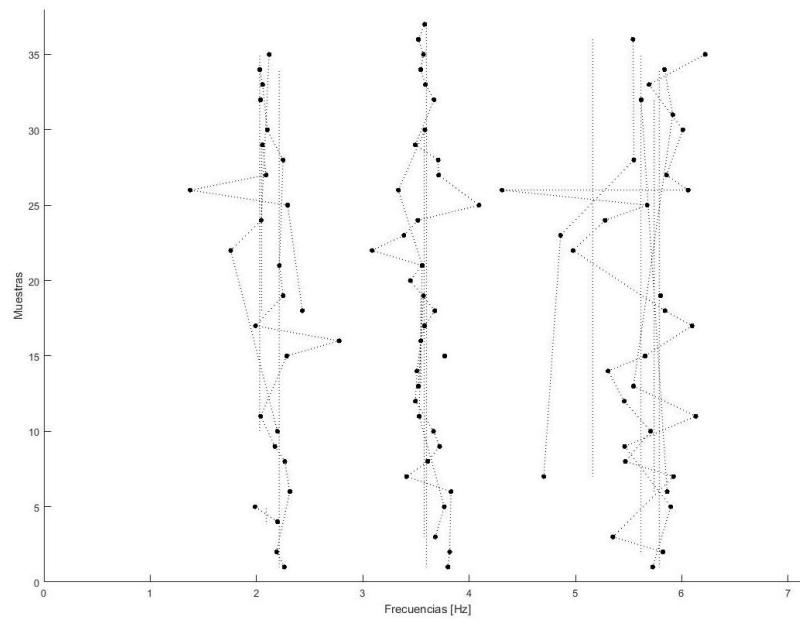


Figura 21. Gráfico de estabilización registros No Coincidentes

En la Figura 20 y Figura 21 se observan los valores de frecuencia donde se concentran la mayor cantidad de datos recolectados permitiendo tener claridad e información sobre los resultados de las propiedades dinámicas.

Modelamiento estructura en SAP2000

A través del modelamiento del laboratorio de estructuras con el programa SAP2000 y teniendo en cuenta las características particulares de cada pórtico, se pretende determinar los valores de modos y frecuencia teóricos, los cuales permitirán determinar la exactitud de los datos procesados a través del sistema de adquisición.

Se tuvo en cuenta la presencia de un puente grúa (Figura 22) en el interior del laboratorio el cual puede desplazarse completamente a lo largo del eje X, por esta razón se generaron cuatro modelos de cada pórtico para identificar el caso más crítico para la edificación. En la Figura 23 se observan los modelos generados del pórtico apoyado sobre aisladores de Neopreno, se utilizó la restricción de translación en sentido X, Y y Z.



Figura 22. Puente grúa, Laboratorio de estructuras.

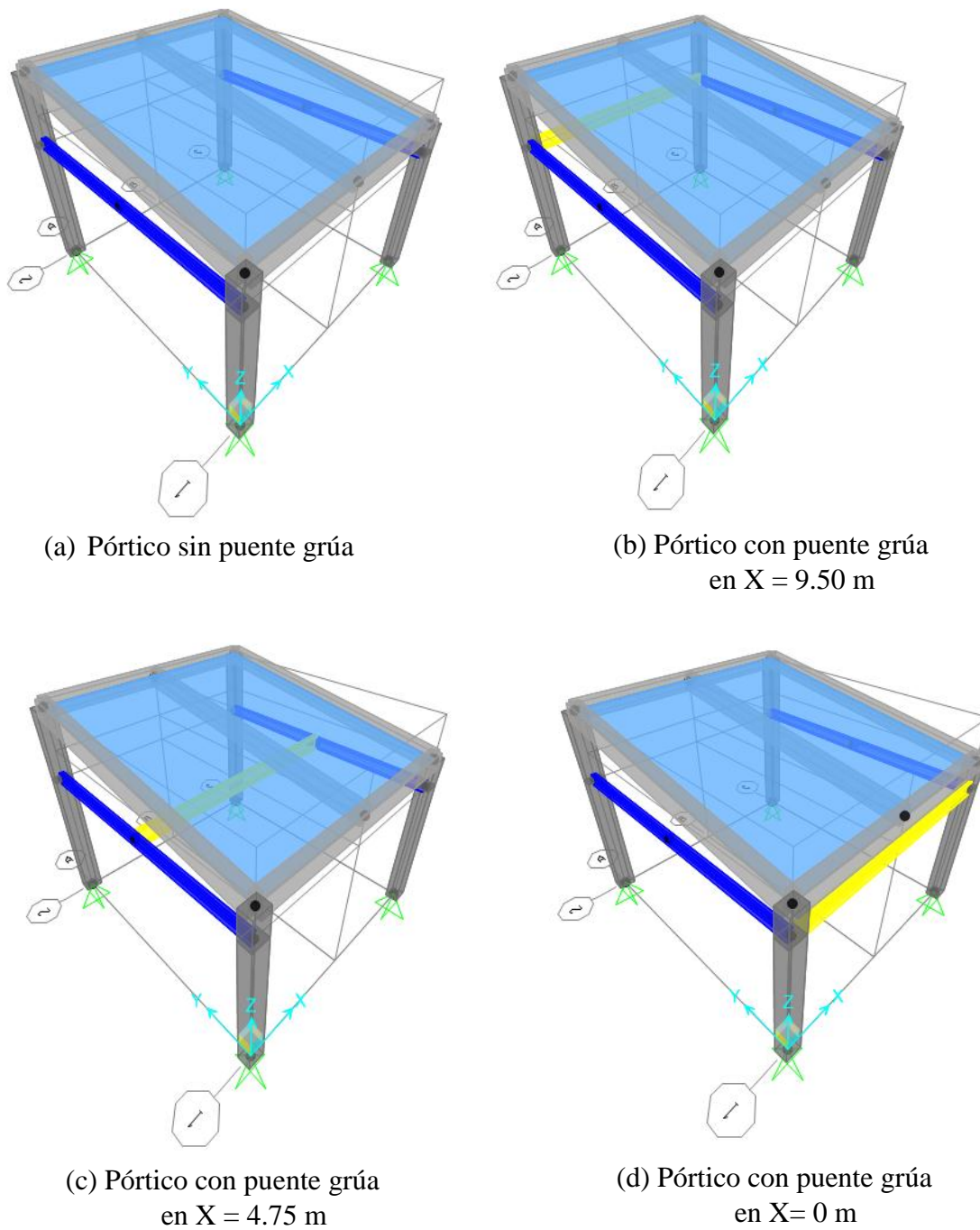
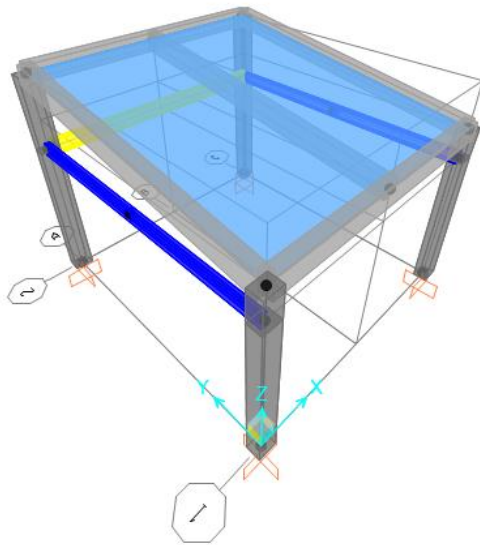
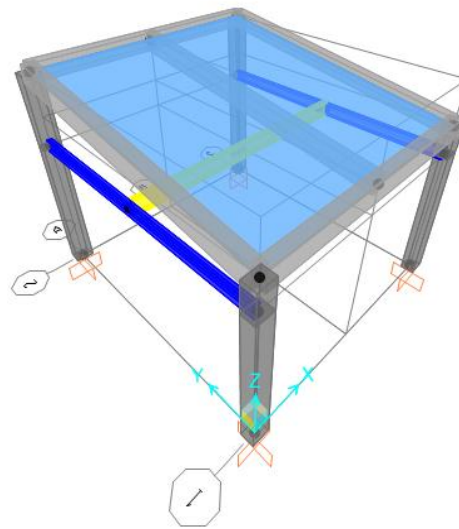


Figura 23 . Pórtico sobre aisladores de neopreno.

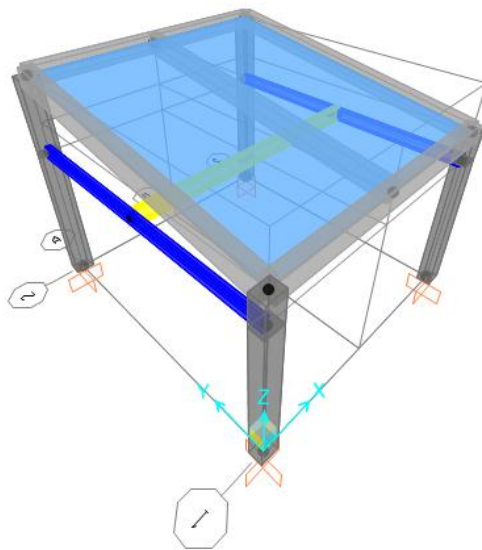
La Figura 24 muestra el diseño del pórtico apoyado sobre cimentación tradicional, se utilizó el empotramiento con restricciones de translación y rotación en sentido X, Y y Z.



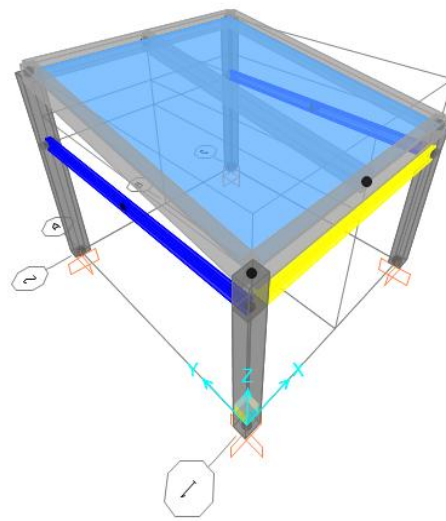
(b) Pórtico sin puente grúa



(b) Pórtico con puente grúa
en $X = 9.50$ m



(c) Pórtico con puente grúa
en $X = 4.75$ m



(d) Pórtico con puente grúa
en $X = 0$ m

Figura 24. Pórtico sobre cimentación tradicional.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El post procesamiento de la información se hizo través de la metodología ERA que a través de la función de transferencia indica la energía con la que responde el sistema permitiendo calcular cual es la respuesta del sistema ante un impulso unitario, en la Figura 25 y Figura 26 se observan los resultados de potencia en la dirección X y Y para la estructura rígida y aislada.

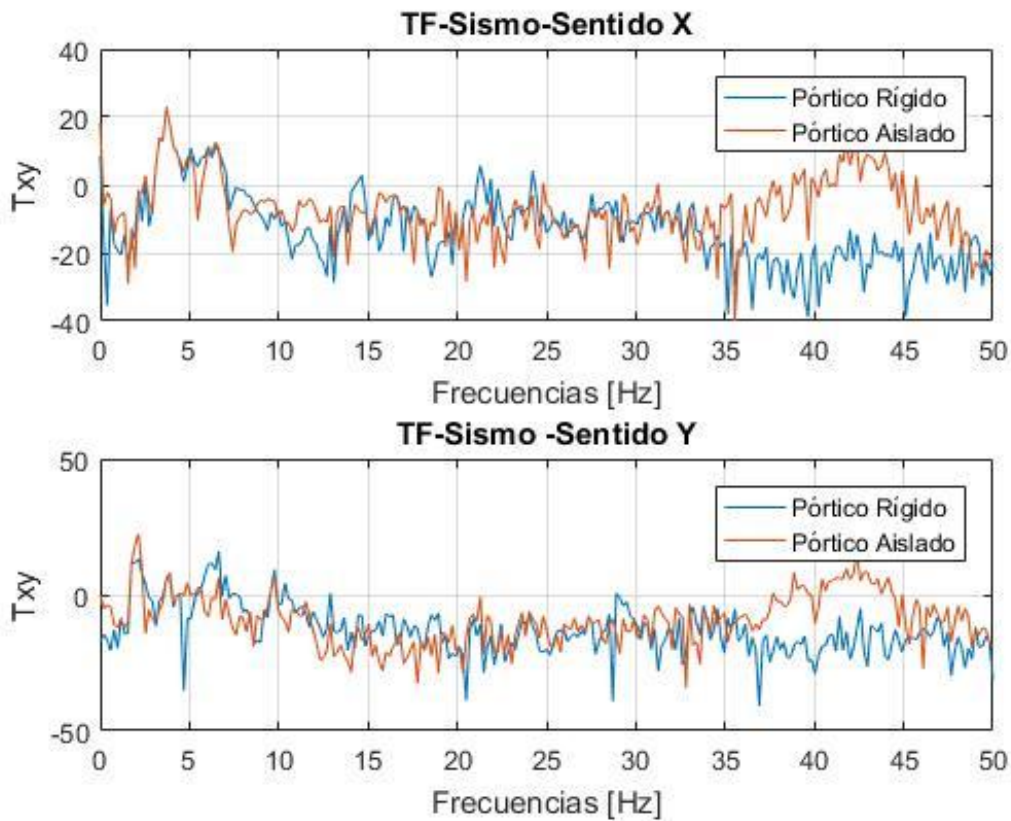


Figura 25. Funciones de transferencia para Registros Coincidentes

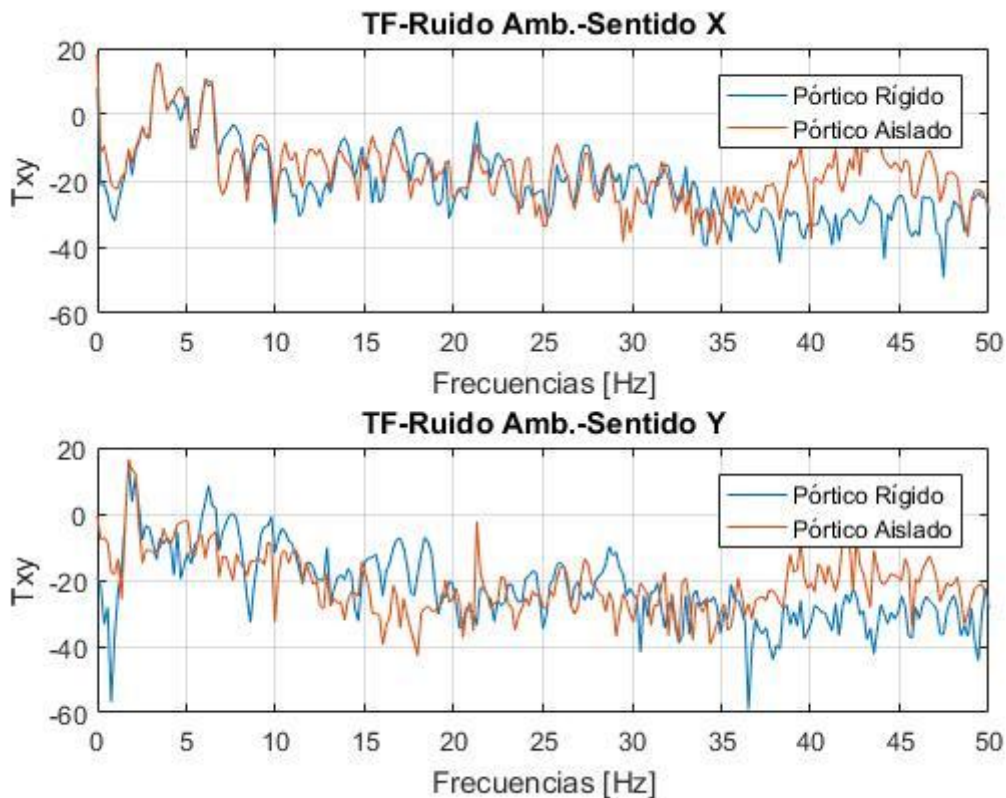


Figura 26. Funciones de transferencia para Registros No Coincidentes

Se obtuvieron valores de las propiedades dinámicas de la estructura para el pórtico sobre cimentación tradicional (1) y para el pórtico sobre aisladores de neopreno (2) y se representaron en histogramas (Figura 27, 28, 29 y 30). La variación entre frecuencias es mínima y esto puede atribuirse a defectos en el método constructivo ya que la estructura soportada sobre aisladores se encuentra restringida en desplazamiento en el eje X (Figura 31; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) debido a su proximidad con la viga de cimentación de la estructura soportada en cimentación tradicional.

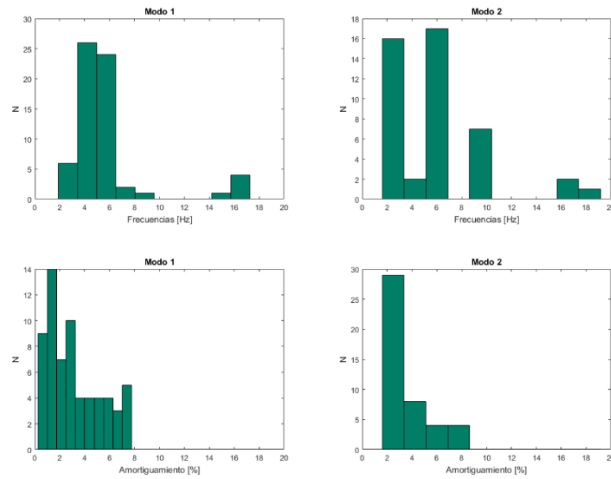


Figura 27. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Rígido Registros Coincidentes

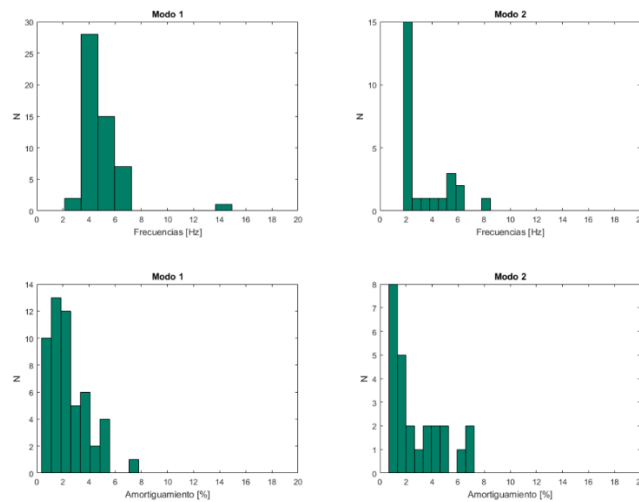


Figura 28. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Aislado Registros Coincidentes

Tabla 1. Resultados registros Coincidentes

PORTICO	MOD0 1		MOD0 2	
	FRECUENCIA X (Hz)	AMORTIGUAMIENTO (%)	FRECUENCIA Y (Hz)	AMORTIGUAMIENTO (%)
1	4.18	1.38	2.48	2.48
2	4.03	2.14	2.14	1.02

El amortiguamiento en el modo 1 de vibración, es decir, en el sentido X presenta un aumento considerable pasando de 1.38 % a 2.48% podría decirse que los aisladores están funcionando correctamente en esta dirección, sin embargo, en el modo 2 de vibración, es decir, en el sentido Y, el amortiguamiento disminuyó pasando de 2.14% a 1.02%.

La metodología ERA identificó para el modo 1 de vibración en sentido X en el pórtico sobre cimentación tradicional una frecuencia fundamental de 4.18 Hz y para el pórtico sobre aisladores de neopreno 4.03 Hz y para el modo 2 de vibración en sentido Y en el pórtico sobre cimentación tradicional una frecuencia fundamental de 2,48 Hz y para el pórtico sobre aisladores de neopreno 2,14 Hz siendo los valores más altos en el histograma de frecuencias.

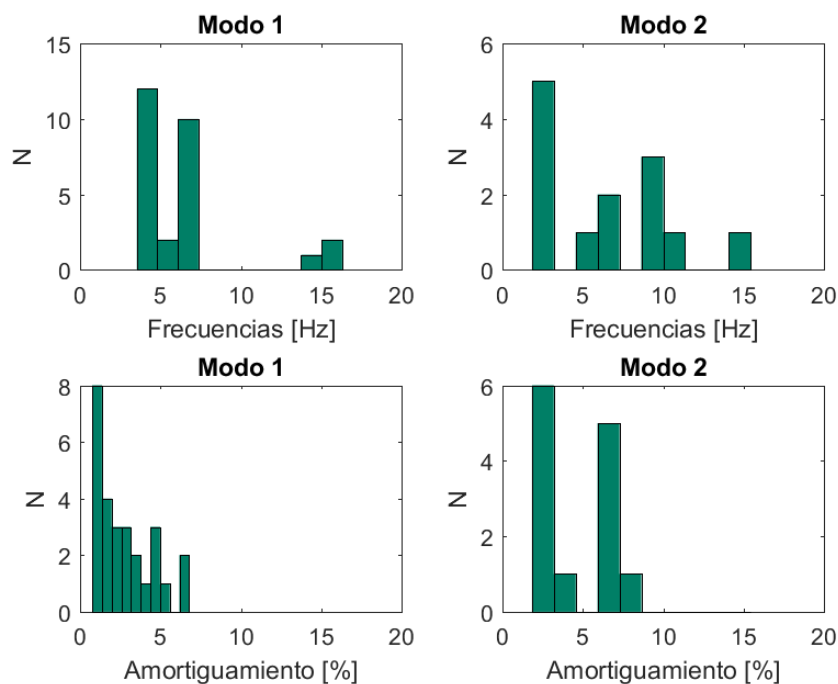


Figura 29. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Rígido Registros No Coincidentes

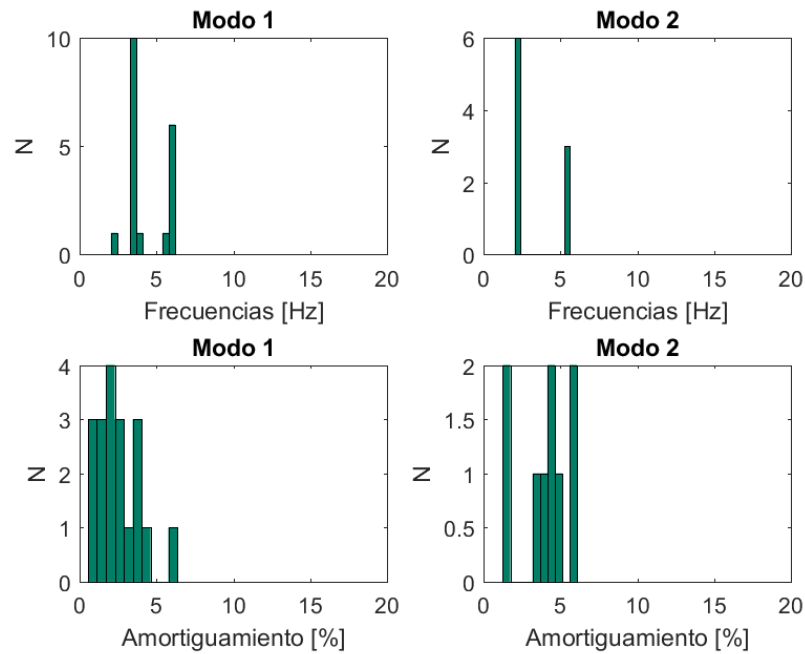


Figura 30. Histogramas propiedades dinámicas Pórtico Aislado Registros No Coincidentes.

Tabla 2. Resultados registros No Coincidentes

PORTICO	MODO 1		MODO 2	
	FRECUENCIA X (Hz)	AMORTIGUAMIENTO (%)	FRECUENCIA Y (Hz)	AMORTIGUAMIENTO (%)
1	4.17	1.06	3.50	2.21
2	3.50	2.31	2.20	1.50

El amortiguamiento en el modo 1 de vibración, es decir, en el sentido X presenta un aumento considerable pasando de 1.06 % a 2.31% podría decirse que los aisladores están funcionando correctamente en esta dirección, sin embargo, en el modo 2 de vibración, es decir, en el sentido Y, el amortiguamiento disminuyó pasando de 2.21% a 1.50%.

La metodología ERA identificó para el modo 1 de vibración en sentido X en el pórtico sobre cimentación tradicional una frecuencia fundamental de 4.17 Hz y para el pórtico sobre aisladores de neopreno 2.51 Hz y para el modo 2 de vibración en sentido Y en el pórtico sobre cimentación tradicional una frecuencia fundamental de 3.50 Hz y para el pórtico sobre aisladores de neopreno 2.20 Hz siendo los valores más altos en el histograma de frecuencias.

Al comparar los valores de los modelos se hace evidente la afectación que tiene sobre el pórtico sísmicamente aislado la restricción en el eje X debido a su ubicación junto a la viga de cimentación, por esta razón la disminución de frecuencia en el pórtico sobre aisladores de neopreno es mínima, pasando de 4.18 Hz a 4.03 Hz para los registros coincidentes y de 2.48 Hz a 2.14 Hz para los registros no coincidentes.



Figura 31. Aislador de neopreno en la base del pórtico.

MODELAMIENTO EN SAP 2000

Se seleccionaron los datos de los primeros tres modos de cada pórtico ya que en estos participa la totalidad de la masa de cada estructura, se evidenció la variación en las propiedades dinámicas dependiendo de la posición del puente grúa y del tipo de cimentación en la que se encuentra apoyada.

Tabla 3. Resultados propiedades dinámicas del pórtico sobre cimentación tradicional.

Pórtico Cimentación	Modo					
	1		2		3	
Caso	f (Hz)	T(s)	f (Hz)	T(s)	f (Hz)	T(s)
0	1.84	0.54	1.98	0.5	2.11	0.47
1	1.83	0.54	2.08	0.48	2.11	0.47
2	1.28	0.78	1.83	0.55	2.02	0.5
3	1.83	0.55	1.99	0.5	2.11	0.47

Tabla 4. Resultados propiedades dinámicas del pórtico sobre aisladores de neopreno.

Pórtico Neopreno	Modo					
	1		2		3	
Caso	f (Hz)	T(s)	f (Hz)	T(s)	f (Hz)	T(s)
0	0.92	1.08	0.95	1.05	1.21	0.82
1	0.92	1.09	1.21	0.82	1.22	0.82
2	0.91	1.09	0.94	1.06	1.18	0.84
3	0.91	1.09	0.96	1.04	1.39	0.72

Del modelo teórico la frecuencia más alta obtenida fue 2.11 Hz para el pórtico sobre cimentación tradicional y 1.39 Hz para el pórtico sobre aisladores de neopreno; lo anterior comprueba las predicciones teóricas del aumento del periodo fundamental de la estructura en presencia de aisladores de neopreno.

Los valores de frecuencia varían significativamente entre el modelo teórico y los resultados experimentales como se puede observar en la tabla 5:

Tabla 5. Resultados experimentales y teóricos.

PORTICO	MODO 1 (Sentido X)		MODO 2 (Sentido Y)	
	Frecuencia Experimental(Hz)	Frecuencia Teórica (Hz)	Frecuencia Experimental(Hz)	Frecuencia Teórica (Hz)
1	4.18	1.84	2.48	2.08
2	4.03	0.92	2.14	1.21

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores de frecuencia obtenidos tanto para los registros coincidentes con la Red Sismológica Nacional de Colombia como los no coincidentes presentan una variación poco significativa (Tabla 1 y 2), el pórtico 1 soportado en cimentación tradicional tiene valores de frecuencia 4.18 Hz y 2.48 Hz mientras que el pórtico 2 soportado en aisladores de neopreno tiene valores de 4.03 Hz y 2.14 Hz; los resultados anteriores permiten verificar una disminución de frecuencias que aportan los aisladores de neopreno a la estructura; sin embargo son variaciones muy bajas con 3% para el sentido X y 13% para el sentido Y; en comparación a los resultados obtenidos en el modelo teórico donde la frecuencia fundamental pasa de valores de 2.11 Hz a 1.39 Hz, es decir, una reducción del 36% , por esta razón se puede afirmar que el aporte que está haciendo el sistema de aislamiento sísmico es mínimo.

La función de transferencia en sentido X (Figura 25) se observa una disminución significativa en la potencia del pórtico aislado con respecto al pórtico rígido en frecuencias cercanas a 7.3 Hz y 8.3 Hz; en la función de transferencia sentido Y (Figura 26) la potencia disminuye en frecuencias cercanas a 3.4 Hz lo que permite deducir un mejor funcionamiento de los aisladores de neopreno en sentido Y, ya que esta disminución se da cerca a la frecuencia fundamental del sistema obtenida con el modelo teórico.

El sistema de monitoreo de vibraciones utilizado en el laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana es limitado ya que se cuentan únicamente con siete sensores los cuales se ubicaron estratégicamente, sin embargo los datos recolectados están sesgados a dos direcciones (X y Y) , además solo se está monitoreando la base del pórtico sobre cimentación tradicional; lo anterior hace notar la necesidad de mejorar el sistema de adquisición de la estructura para realizar futuras investigaciones.

LISTA DE REFERENCIAS

- Bergoeing J, Q. M., (2009). Tectónica de placas y sismicidad en América Central. Revista Geográfica Available from: Academic Search Complete, Ipswich, MA.
- Bloomfield P., (2000). Fourier Analysis of time series an introduction, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Caicedo, Juan M. (2003). Structural Health Monitoring of Flexible Civil Structures. D.Sc., Washington University in Saint Louis, Saint Louis, Missouri.
- CEPAL, (2010). Terremoto en Chile una primera mirada al 10 de marzo de 2010. <http://www.cepal.orgf>. En línea: 04/05/2017.
- Chopra A. K., (1995). Dynamics of structures.
- Davis Bartholomew, (1963). Electrical measurements and instrumentation, Allyn and Bacon.
- Dynamic Isolation Systems, (2017). <http://www.dis-inc.com/> En línea: 03/05/2017.
- Farrar C. R., James G.H.. (1998). system identification from ambient vibration measurements on a bridge. journal of sound and vibration.
- García, l. e. r., (1998). Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad De Los Andes.
- George H. James, Thomas G. Carne, Lauffer J. P., (1995). The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures. The International journal of analytical and experimental modal analysis.
- Hurtado J. E., (2000). Introducción a la dinámica de estructuras, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- James K., (2013). “A Tested, Inexpensive Way to Protect Buildings from Earthquakes”, www.pbs.org. En línea: 09/05/2017.
- Mayorga V. C. A., (2011). Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostamiento de pandeo restringido. Universidad Nacional de Colombia.
- National Instruments (2014). NI Signal Express. <http://www.ni.com>. En línea: 10/04/2017.

National Instruments (2017). ¿Qué es adquisición de datos?. <http://www.ni.com>. En línea: 10/04/2017.

Ogata, Katsuhiko (2010). *Modern Control Engineering*. Fifth Edition. Prentice Hall.
Perico M. N. R., & Perico G. N. R. (2014). Caracterización y recurrencia sísmica del nido de Bucaramanga. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja.

PCP, Vibración, amortiguamiento y resonancia, (2017). <https://www.pcpaudio.com>. En línea: 04/05/2017.

Pytel A. & Singer E. L., (1994). *Resistencia de materiales*, Oxford University Press.
Red Sismológica Nacional de Colombia, (2016). <http://seisan.sgc.gov.co>. En línea: 05/10/2016.

Retamoso, Claudia P., (2005). *Diseño sísmo resistente de edificios*. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Santander.

Rotondo, L. M. B., & Barbat, A. H., (1999). *Diseño sísmo resistente de edificios: técnicas convencionales y avanzadas*. Reverte.

Salgado M, Bernal G, Yamín L, Cardona O., (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sísmo resistente NSR-10. *Revista De Ingeniería*, Academic Search Complete, Ipswich, MA.

Tamura Y., Zhang L., Yoshida A. Nakata S., Itoh T., (2002). *Ambient Vibration Tests and Modal Identification of Structures*. Yokohama, Japan.

USGS, (2011). *Maps, Natural Hazards*. <https://www.usgs.gov>. En línea: 04/05/2017.