



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE COMPONENTES INDEPENDIENTES
PARA LA OBTENCIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS
EN ESTRUCTURAS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

ALAN DAMIAN SÁNCHEZ PULIDO



TUTOR:
DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

DR. FRANCISCO JOSÉ RIVERO ÁNGELES

2012

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Gómez Martínez Roberto
Secretario:	M. I. García Domínguez Octavio
Vocal:	Dr. Escobar Sánchez José Alberto
1 ^{er} . Suplente:	Dr. Rivero Ángeles Francisco José
2 ^{do} . Suplente:	Dr. Terán Gilmore Amador

MÉXICO D.F.

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

A Dios y *mis* papas
Gracias a ustedes
Estoy aquí

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada le doy muchas gracias a Dios por darme la oportunidad de estar aquí, por acompañarme en cada momento de mi vida y sobre todo por poner en mi camino a todas las personas que estoy por mencionar.

Sin lugar a dudas primero que nada están mis papas Paty y Roman quienes me han apoyado en cada instante en mi vida, a ustedes les debo todo lo que soy y gracias a su apoyo estoy aquí para seguir creciendo como persona. A mi hermano Erik definitivamente mi primer y mejor amigo.

A mi principal influencia en la ingeniería Paco a quien siempre le estaré agradecido ya que gracias a él encontré la forma en como espero sea mi futuro como ingeniero e investigador. Su constante apoyo y guía me han enseñado que existe un mundo de posibilidades para identificar, analizar y resolver cualquier problema o situación que se presente en nuestra vida ya sea profesional o personal.

Le doy las gracias a mis tutores y sinodales: Alberto Escobar, Roberto Gómez, Octavio García, Amador Terán, por leer mi tesis, dedicarme su tiempo para contribuir con sus valiosas opiniones, las cuales definitivamente enriquecieron en gran medida mi trabajo escrito y mi formación académica.

A continuación agradezco a un grupo de personas que han estado en gran parte de mi vida aunque en etapas diferentes, mis entrenadores: Chamolo, Arturo Argudín, Fabrizio Chamor, Juan Beltrán, Marco Gómez y Tere Vallejo. Gracias a ustedes las palabras; compromiso, esfuerzo, responsabilidad, determinación, superación, confianza, tenacidad y constancia cobraron un nuevo significado en mi vida.

A mis amigos de toda la vida: Elenita, Moyado, Santos, Rodrigo, Ezequiel y a pesar del tiempo y la distancia; Inés, Aline, Paula, Tania, Adri, Lobato, Juancho y De Leo quienes siempre tendrán un lugar muy especial en mi corazón.

Una mención especial individual para Mayani, quien indudablemente ha sido un gran amigo, en definitiva es un gran ejemplo a seguir y a pesar de que no sabe mucho de americano, le gusta apostar.

Gracias a mis amigos de la carrera; Agustín, Jesús, Julián, Juan Carlos y Fernando con quienes compartí la emoción de llegar a ser ingeniero civil. A mis amigos de la maestría: Iván, Rene, Josué, Andrés, Tirso, Terán, Marcial, David y Paco quienes me enseñaron otro nivel de comprensión y entusiasmo por la ingeniería civil.

A continuación quiero agradecerles a todos mis amigos que han compartido mi más grande pasión en la vida; los deportes. A todos los integrantes de la selección de volibol varonil de la Ibero, especialmente a: Iván, Leo, Héctor, Juan, Julio, Iker y Renán. A los integrantes de las selecciones varonil y femenil de atletismo de la Ibero, con una mención especial para: Franjo, Jimmy, Ana Lu, Bernardo, Natalia, Juanjo, Sergio, Robina, Abby e Ifis. Al gran equipo que es Aldebaran especialmente a: Mi tocayo, Gabriel, Juan, Santiago, Limón, Rodrigo, Negro, Diana e Itzel. Finalmente a mi nueva familia Top Athletics.

En definitiva los lazos más fuertes e importantes en la vida se crean con la gente con la que compartes; la tristeza de una derrota, la alegría de un triunfo, el cansancio de un entrenamiento pero sobre todo la satisfacción de una meta alcanzada ya sea propia o de un miembro de tu equipo, tu familia.

Toca el turno de agradecer al resto de mi familia empezando por México y hasta Mexicali, abuelas, tíos, tías, primos y primas, quienes a pesar de que no escriba cada uno de sus nombres saben que son una parte muy importante en mi vida.

Mi trabajo no habría sido posible sin el apoyo económico de CONACYT, institución con quien estoy profundamente agradecido y a quien corresponderé esforzándome por ser cada día un mejor profesional para mi país.

RESUMEN

En la actualidad se cuenta con un gran número de métodos utilizados para la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras (periodos y formas modales). Éstas se utilizan para identificar, localizar y cuantificar el daño de sus elementos estructurales. Sin embargo, algunos de los métodos más utilizados pueden llegar a ser imprecisos debido a que se basan en la interpretación de los registros obtenidos. Si esta interpretación se fundamenta en la experiencia de la persona que trabaja con dichos datos, la obtención puede llegar a ser subjetiva.

Este trabajo tiene como objetivo presentar un método de identificación por medio de la descomposición de señales en el que la obtención de los periodos de vibración resultó más fácil de interpretar que lo que se hace actualmente, llamado análisis de componentes independientes (ACI). Originalmente este método ha sido utilizado para identificar señales falsas en magnetoencefalografías, para encontrar factores ocultos en datos financieros, así como para reducir el ruido en imágenes digitalizadas. Este método busca una representación lineal en la que los componentes tengan la mayor independencia posible.

Se presenta la comparación del ACI con dos de los métodos de identificación de propiedades dinámicas más utilizados (el análisis espectral convencional, AEC, y el de descomposición en el dominio de la frecuencia, DDF). Se destacan las ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos.

Para la comparación de los métodos se utilizaron los datos de un marco bidimensional de cuatro pisos propuesto en la literatura, los de un modelo en tres dimensiones de cuatro pisos de los que se conocen sus propiedades dinámicas, utilizando como excitación en la base al acelerograma del sismo registrado en la estación SCT, en 1985, dirección Este-Oeste (escalado) y los datos obtenidos de una prueba de vibración ambiental realizada a un edificio de concreto de siete pisos ubicado en la ciudad de México.

ABSTRACT

Nowadays there are a great number of methods used to obtain the dynamic properties of structures (modal frequency and mode shapes). With these we can identify, locate and quantify the damage on the different structural elements. However, some of the most common methods can be imprecise due to the fact that they are based on the interpretation of certain measurements. As this interpretation depends on the personal experience of the individual working on the data, the results can be very subjective.

The objective of this work is to present a method of identification through signal decomposition, known as Independent Component Analysis (ICA), in which the obtained vibration periods are easier to interpret. Originally, this method has been used to identify false signals in magnetoencephalograms, to find hidden factors in financial data and to reduce the noise in digital images. It searches for a lineal representation in which the components are as independent as possible.

A comparison is made between the ICA and two of the most common methods for identification of dynamic properties (the Conventional Spectral Analysis, CSA, and the Frequency Domain Decomposition, FDD). The advantages and disadvantages of each method are discussed.

For the comparison of methods, the data was taken from three sources: a two-dimensional, four-floor frame proposed in the literature; a three-dimensional, four-floor model with known dynamical properties, using as the base perturbation the accelerogram from the 1985 earthquake registered at the SCT station, East-West direction (scaled); and the environmental vibration test performed on a seven-story concrete building in Mexico City.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
CONTENIDO	xiii
LISTA DE TABLAS	xvii
LISTA DE FIGURAS	xix
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ESTADO DEL ARTE	1
1.2.1 Clasificación de técnicas de identificación	2
1.2.2 Descripción de métodos de identificación	3
1.3 OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 2 OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES	5
2.1 PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL.....	5
2.1.1 Introducción	5
2.1.2 Herramientas de instrumentación	5
2.1.3 Instrumentación de estructuras.....	6
2.2 PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....	7
2.2.1 Filtros.....	7
2.2.2 Función compleja indicadora de modos (FCIM).....	7
2.3 OBTENCIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL SUELO.....	9
CAPÍTULO 3 BASES DE IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS	11
BASES DE IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS.....	11
3.1 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS.....	11
3.1.1 Análisis espectral convencional (AEC)	11
3.1.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia (DDF)	12
3.1.3 Análisis de componentes independientes (ACI).....	13
3.2 CRITERIOS DE CORRELACIÓN DE FORMAS MODALES	15
3.2.1 Criterio de correlación modal (CCM).....	15
3.2.2 Criterio de correlación modal coordinado (CCMC)	15
3.2.3 Diferencia modal normalizada (DMN).....	16
CAPÍTULO 4 APLICACIÓN	17

4.1 MODELO BIDIMENSIONAL.....	17
4.1.1 Introducción	17
4.1.1.1 Propiedades físicas del modelo.....	17
4.1.1.2 Obtención de registros	18
4.1.1.3 Propiedades dinámicas del modelo.....	20
4.1.2 Aplicación de métodos.....	21
4.1.2.1 Análisis espectral convencional.....	21
4.1.2.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia.....	29
4.1.2.3 Análisis de componentes independientes	34
4.1.3 Análisis y comparación de resultados.....	37
4.1.3.1 Periodos.....	37
4.1.3.2 Formas modales	38
4.1.3.3 Conclusiones	38
4.2 MODELO TRIDIMENSIONAL	39
4.2.1 Introducción	39
4.2.1.1 Propiedades geométricas	39
4.2.1.2 Obtención de registros	40
4.2.1.3 Propiedades dinámicas del modelo tridimensional.....	40
4.2.2 Aplicación de métodos.....	41
4.2.2.1 Análisis espectral convencional.....	41
4.2.2.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia.....	48
4.2.2.3 Análisis de componentes independientes	50
4.2.3 Análisis y comparación de resultados.....	53
4.2.3.1 Periodos.....	53
4.2.3.2 Formas modales	54
4.2.3.3 Conclusiones	56
4.3 EDIFICIO DE CONCRETO	56
4.3.1 Introducción	56
4.3.1.1 Descripción del edificio	56
4.3.1.2 Características del equipo de medición.....	57
4.3.1.3 Puntos de medición.....	57
4.3.1.4 Metodología de medición.....	58
4.3.1.5 Preprocesamiento de señales	58
4.3.1.6 Obtención del periodo fundamental de vibración del suelo	59

4.3.2 Aplicación de métodos.....	61
4.3.2.1 Análisis espectral convencional.....	61
4.3.2.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia.....	65
4.3.2.3 Análisis de componentes independientes.....	69
4.3.3 Análisis y comparación de resultados.....	73
4.3.3.1 Periodos.....	73
4.3.3.2 Formas modales.....	75
4.3.3.3 Conclusiones.....	77
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS.....	81
APÉNDICE A.....	85
APENDICE B.....	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Periodos y formas modales teóricos del marco bidimensional.....	20
Tabla 4.2 Periodos (s) localizados en espectros de Fourier.....	23
Tabla 4.3 Periodos (s) localizados en los autoespectros de potencia.....	24
Tabla 4.4 Periodos de vibración seleccionados del modelo bidimensional.....	25
Tabla 4.5 Ángulos de fase de los periodos del marco bidimensional.....	27
Tabla 4.6 Ángulos de fase del cuarto modo modelo bidimensional.....	27
Tabla 4.7 Valor función de transferencia modelo bidimensional.....	28
Tabla 4.8 Valores de las formas modales marco bidimensional.....	29
Tabla 4.9 Periodos localizados en la variación de valores singulares modelo bidimensional.....	30
Tabla 4.10 Frecuencias y periodos identificados, modelo bidimensional.....	31
Tabla 4.11 Valores n para la obtención de las matrices espectrales de potencia.....	32
Tabla 4.12 Periodos y formas modales obtenidas por medio de DDF modelo bidimensional.....	34
Tabla 4.13 Periodos de cada fuente obtenida con ACI para el marco bidimensional.....	35
Tabla 4.14 Valores de la función de transferencia para cada periodo localizado con ACI modelo bidimensional.....	36
Tabla 4.15 Formas modales generadas con base en ACI modelo bidimensional.....	36
Tabla 4.16 Periodos (s) localizados modelo bidimensional.....	37
Tabla 4.17 Error relativo en la obtención de periodos de vibración (%) modelo bidimensional.....	37
Tabla 4.18 DMN de las formas modales para el modelo bidimensional.....	38
Tabla 4.19 Periodos teóricos del modelo tridimensional.....	40
Tabla 4.20 Formas modales teóricas normalizadas al cuarto piso modelo tridimensional.....	40
Tabla 4.21 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier dirección X.....	42
Tabla 4.22 Periodos (s) localizados en los autoespectro de potencia dirección X.....	43
Tabla 4.23 Periodos de vibración localizados en la dirección X del modelo tridimensional (AEC).....	43
Tabla 4.24 Ángulos de fase dirección X modelo tridimensional.....	43
Tabla 4.25 Valores de la función de transferencia dirección X modelo tridimensional (AEC).....	44
Tabla 4.26 Periodos (s) localizados en los espectro de Fourier en dirección Y.....	45
Tabla 4.27 Periodos de vibración de la estructura dirección Y modelo tridimensional (AEC).....	45
Tabla 4.28 Formas modales dirección Y modelo en tres dimensiones (AEC).....	46
Tabla 4.29 Periodos (s) de torsión localizados en espectros de Fourier.....	46
Tabla 4.30 Periodos de torsión localizados en espectros de Fourier modelo tridimensional (AEC).....	46
Tabla 4.31 Formas modales de torsión modelo tridimensional (AEC).....	47
Tabla 4.32 Periodos (s) localizados modelo tridimensional (DDF).....	49
Tabla 4.33 Formas modales dirección X modelo tridimensional (DDF).....	49
Tabla 4.34 Formas modales dirección Y modelo tridimensional (DDF).....	49
Tabla 4.35 Formas modales de torsión modelo tridimensional (DDF).....	49
Tabla 4.36 Formas modales dirección X modelo tridimensional (ACI).....	52
Tabla 4.37 Formas modales dirección Y modelo tridimensional (ACI).....	52
Tabla 4.38 Formas modales de torsión modelo tridimensional (ACI).....	53
Tabla 4.39 Periodos (s) localizados dirección X modelo tridimensional.....	53
Tabla 4.40 Periodos (s) localizados dirección Y modelo tridimensional.....	53
Tabla 4.41 Periodos (s) localizados de torsión modelo tridimensional.....	54
Tabla 4.42 Errores relativos de periodos modelo tridimensional.....	54
Tabla 4.43 Diferencia modal normalizada para el modelo tridimensional.....	54
Tabla 4.44 Relación de pisos y puntos de medición.....	58
Tabla 4.45 Periodos del suelo obtenidos mediante la técnica de Nakamura.....	60
Tabla 4.46 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier dirección X.....	62
Tabla 4.47 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier dirección Y.....	62
Tabla 4.48 Periodos asociados a las direcciones de análisis del edificio de concreto (AEC).....	63
Tabla 4.49 Formas modales dirección X edificio de concreto (AEC).....	64
Tabla 4.50 Formas modales dirección Y edificio de concreto (AEC).....	64
Tabla 4.51 Formas modales de torsión del edificio de concreto (AEC).....	65
Tabla 4.52 Periodos (s) localizados por medio de gráficas de valores singulares dirección X.....	66
Tabla 4.53 Periodos (s) localizados por medio de gráficas de valores singulares dirección Y.....	67
Tabla 4.54 Periodos definidos en las direcciones de análisis del edificio de concreto (DDF).....	67
Tabla 4.55 Identificación de matriz de densidad espectral asociada a periodos de vibración.....	67
Tabla 4.56 Formas modales dirección X edificio de concreto (DDF).....	68
Tabla 4.57 Formas modales dirección Y edificio de concreto (DDF).....	68
Tabla 4.58 Formas modales de torsión del edificio de concreto (DDF).....	68
Tabla 4.59 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier de las fuentes dirección X.....	71
Tabla 4.60 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier de las fuentes dirección Y.....	71
Tabla 4.61 Periodos de vibración definidos en las direcciones de análisis edificio de concreto (ACI).....	72

Tabla 4.62 Formas modales dirección X edificio de concreto (ACI).....	72
Tabla 4.63 Formas modales dirección Y edificio de concreto (ACI).....	72
Tabla 4.64 Formas modales de torsión del edificio de concreto (ACI).....	73
Tabla 4.65 Periodos (s) del edificio de concreto localizados en la dirección X.....	73
Tabla 4.66 Periodos (s) del edificio de concreto localizados en la dirección Y.....	74
Tabla 4.67 Periodos (s) de torsión localizados para el edificio de concreto	74
Tabla A.1 Criterios de comparación modal, con base en los datos generados por el AEC en el modelo bidimensional	88
Tabla A.2 Criterios de comparación modal, con base en los datos generados por el DDF en el modelo bidimensional	88
Tabla A.3 Criterios de comparación modal, con base en los datos generados por el ACI en el modelo bidimensional.....	88
Tabla A.4 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección X, método AEC.....	96
Tabla A.5 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección X, método DDF.....	96
Tabla A.6 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección X, método ACI.....	97
Tabla A.7 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección Y, método AEC.....	97
Tabla A.8 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección Y, método DDF.....	97
Tabla A.9 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección Y, método ACI.....	97
Tabla A.10 Criterios de comparación modal modelo 3D torsión, método AEC.....	97
Tabla A.11 Criterios de comparación modal modelo 3D torsión, método DDF.....	98
Tabla A.12 Criterios de comparación modal modelo 3D torsión, método ACI.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de un acelerómetro.....	6
Figura 2.2 Espectros horizontal y vertical en el terreno	10
Figura 2.3 Función de transferencia entre ordenadas espectrales horizontal y vertical.....	10
Figura 3.1 Diagrama de flujo método análisis espectral convencional	11
Figura 3.2 Diagrama de flujo método descomposición en el dominio de la frecuencia.....	12
Figura 3.3 Diagrama de flujo método análisis de componentes independientes.....	14
Figura 4.1 Propiedades físicas del marco teórico bidimensional	17
Figura 4.2 Registro de SCT 1985 dirección Este-Oeste	18
Figura 4.3 Espectros de respuesta registro SCT 1985	19
Figura 4.4 Espectro de Fourier de registro SCT 1985 escalado.....	19
Figura 4.5 Respuesta dinámica registrada en los pisos del marco bidimensional.....	20
Figura 4.6 Configuración de las formas modales del modelo bidimensional	21
Figura 4.7 Espectros de Fourier de las respuestas dinámicas del modelo bidimensional	22
Figura 4.8 Espectro de Fourier de las respuestas de todos los pisos.....	22
Figura 4.9 Autoespectros de potencia de las respuestas dinámicas del modelo bidimensional.....	23
Figura 4.10 Espectro cruzado de potencia entre terreno y pisos modelo bidimensional.....	24
Figura 4.11 Ampliación espectros de Fourier de los pisos del modelo bidimensional.....	25
Figura 4.12 Ángulo de fase del espectro cruzado entre el terreno y pisos, modelo bidimensional	26
Figura 4.13 Ampliación por periodo de gráfica de ángulo fase	26
Figura 4.15 Función de transferencia con respecto al terreno marco bidimensional.....	28
Figura 4.16 Variación de valores singulares del modelo bidimensional	30
Figura 4.17 Variación de valores singulares con respecto a la frecuencia modelo bidimensional	31
Figura 4.18 Variación de valores singulares con respecto a la frecuencia, obtención de valor n	31
Figura 4.19 Magnitud de valores singulares para cada periodo localizado.....	33
Figura 4.20 Espectros de Fourier de las fuentes obtenidas por el ACI para el modelo bidimensional	35
Figura 4.21 Espectro de Fourier de todas las fuentes marco bidimensional	36
Figura 4.22 Configuración de formas modales generadas para el marco bidimensional	38
Figura 4.23 Configuración geométrica del modelo tridimensional	39
Figura 4.24 Espectros de Fourier de los registros generados en el centro de rigides dirección X.....	41
Figura 4.25 Autoespectro de potencia primer piso dirección X.....	42
Figura 4.26 Espectros de Fourier de los registros generados en el centro de rigides dirección Y	44
Figura 4.27 Autoespectro de potencia del registro del segundo piso dirección Y	45
Figura 4.28 Espectros de Fourier para obtención de periodos de torsión modelo tridimensional	47
Figura 4.29 Variación de valores singulares del modelo tridimensional.....	48
Figura 4.30 Espectros de Fourier de fuentes generadas en la dirección X	50
Figura 4.31 Espectro de Fourier de todas las fuentes. Centroidal dirección X	51
Figura 4.32 Espectros de Fourier de fuentes generadas por ACI dirección Y	51
Figura 4.33 Espectros de Fourier de fuentes generadas por ACI para torsión.....	52
Figura 4.34 Configuración de formas modales dirección X modelo tridimensional	55
Figura 4.35 Configuración de formas modales dirección Y modelo tridimensional	55
Figura 4.36 Croquis de ubicación de puntos de medición.....	57
Figura 4.37 Registro de aceleraciones en terreno.....	59
Figura 4.38 Función de transferencia para obtención de periodo del suelo direcciones X y Y	59
Figura 4.39 Periodos dominantes del suelo RCDF NTC Sismo (2004)	60
Figura 4.40 Espectro de Fourier del registro obtenido en el centro de la azotea dirección X	61
Figura 4.41 Espectro de Fourier del registro obtenido en el centro de la azotea dirección Y	62
Figura 4.42 Función de transferencia entre P.B. y azotea. Dirección X.....	63
Figura 4.43 Ángulo de fase entre P.B. y niveles. Dirección Y. $T_2 = 0.55$ s	64
Figura 4.44 Variación de valores singulares escala logarítmica dirección X, registro del centro de la estructura.....	65
Figura 4.45 Variación de valores singulares escala decimal dirección X, registro del centro de la estructura	66
Figura 4.46 Espectros de Fourier de las fuentes obtenidas en el extremo en dirección X	69
Figura 4.47 Espectros de Fourier de las fuentes obtenidas en el centro en dirección X.....	70
Figura 4.48 Configuración de formas modales identificadas con los tres métodos dirección X	75
Figura 4.49 Configuración de formas modales encontradas con (ACI-AEC) y (ACI-DDF) dirección X	76
Figura 4.50 Configuración de formas modales identificadas con los tres métodos dirección Y	76
Figura 4.51 Configuración de formas modales encontradas con (ACI-AEC) y (ACI-DDF) dirección Y	77
Figura A.1 Configuración de formas modales modelo bidimensional	85
Figura A.2 Matrices espectrales de potencia de los picos localizados con en la gráfica de variación de valores singulares	86
Figura A.3 Matrices S_p de los registros de aceleración del marco bidimensional	87
Figura A.4 Matrices U_p de los registros de aceleración del marco bidimensional	87

Figura A.5 Normalización de vectores $U_p(\cdot, I)$ de los registros de aceleración del marco bidimensional	88
Figura A.6 Configuración de formas modales modelo tridimensional eje X vista en isométrico	89
Figura A.7 Configuración de formas modales modelo tridimensional eje Y vista en isométrico	90
Figura A.8 Configuración de la 3er forma modal $T_3=0.4274$ s del modelo tridimensional	91
Figura A.9 Configuración de la 6ta forma modal $T_6=0.1225$ s del modelo tridimensional	91
Figura A.10 Configuración de la 9na forma modal $T_9=0.0585$ s del modelo tridimensional	92
Figura A.11 Configuración de la 12va forma modal $T_{12}=0.0370$ s del modelo tridimensional	92
Figura A.12 Autoespectros de potencia de los registros generados en dirección X del modelo tridimensional	93
Figura A.13 Ángulo de fase del espectro cruzado del terreno y pisos en dirección X del modelo tridimensional	93
Figura A.14 Función de transferencia del espectro cruzado entre terreno y pisos, dirección X.....	94
Figura A.15 Ángulo de fase del espectro cruzado del terreno y pisos en dirección Y del modelo tridimensional	94
Figura A.16 Función de transferencia del espectro cruzado entre terreno y pisos, dirección Y.....	95
Figura A.17 Ángulo de fase del espectro cruzado del terreno y pisos torsional del modelo tridimensional	95
Figura A.18 Función de transferencia del espectro cruzado entre terreno y pisos, torsión.....	96
Figura B.1 Espectros de Fourier de registros en dirección X edificio de concreto.....	99
Figura B.2 Espectros de Fourier de registros en dirección Y edificio de concreto.....	100
Figura B.3 Función de transferencia del espectro cruzado del terreno con pisos dirección X.....	101
Figura B.4 Función de transferencia del espectro cruzado del terreno con pisos dirección Y.....	102
Figura B.5 Función de transferencia del espectro cruzado del terreno con pisos torsión.....	103
Figura B.6 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Dirección X $0.50 \text{ s} < T < 0.73 \text{ s}$	104
Figura B.7 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Dirección X $0.30 \text{ s} < T < 0.47 \text{ s}$	104
Figura B.8 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Dirección Y $0.38 \text{ s} < T < 0.64 \text{ s}$	105
Figura B.9 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Torsión $0.34 \text{ s} < T < 0.73 \text{ s}$	105
Figura B.10 Configuración formas modales dirección X, obtenidas por AEC.....	106
Figura B.11 Configuración formas modales dirección Y, obtenidas por AEC.....	106
Figura B.12 Configuración 1er forma modal de torsión, obtenida por AEC.....	107
Figura B.13 Configuración 2da forma modal de torsión, obtenida por AEC.....	108
Figura B.14 Configuración 3ra forma modal de torsión, obtenida por AEC.....	109
Figura B.15 Configuración 4ta forma modal de torsión, obtenida por AEC.....	110
Figura B.16 Configuración 5ta forma modal de torsión, obtenida por AEC.....	111
Figura B.17 Configuración 6ta forma modal de torsión, obtenida por AEC.....	112
Figura B.18 Variación de valores singulares DDF para la dirección X.....	113
Figura B.19 Variación de valores singulares DDF para la dirección Y.....	113
Figura B.20 Configuración formas modales dirección X, obtenidas por DDF.....	114
Figura B.21 Configuración formas modales dirección Y, obtenidas por DDF.....	114
Figura B.22 Configuración 1ra forma modal de torsión, obtenida por DDF.....	115
Figura B.23 Configuración 2da forma modal de torsión, obtenida por DDF.....	116
Figura B.24 Configuración 3ra forma modal de torsión, obtenida por DDF.....	117
Figura B.25 Configuración 4ta forma modal de torsión, obtenida por DDF.....	118
Figura B.26 Configuración 5ta forma modal de torsión, obtenida por DDF.....	119
Figura B.27 Configuración 6ta forma modal de torsión, obtenida por DDF.....	120
Figura B.28 Espectros de Fourier de las fuentes de los registros del centro de la estructura en dirección Y.....	121
Figura B.29 Espectros de Fourier de las fuentes de los registros en un extremo de la estructura en dirección Y.....	122
Figura B.30 Configuración formas modales dirección X, obtenidas por ACI.....	123
Figura B.31 Configuración formas modales dirección Y, obtenidas por ACI.....	123
Figura B.32 Configuración 1ra forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	124
Figura B.33 Configuración 2da forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	125
Figura B.34 Configuración 3ra forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	126
Figura B.35 Configuración 4ta forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	127
Figura B.36 Configuración 5ta forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	128
Figura B.37 Configuración 6ta forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	129
Figura B.38 Configuración 7ma forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	130
Figura B.39 Configuración 8va forma modal de torsión, obtenida por ACI.....	131

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un gran número de métodos para la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras (periodos de vibración y formas modales). Éstas se utilizan para la actualización de modelos, control estructural e identificar, localizar y cuantificar el daño de sus elementos estructurales. Sin embargo, algunos de los métodos más utilizados pueden llegar a ser imprecisos debido a que se basan en la interpretación de los registros obtenidos. Esta interpretación se fundamenta en la experiencia de quien trabaja con dichos datos, por lo que en ocasiones llega a ser subjetiva.

En este trabajo se presentará un método de identificación y descomposición de señales, llamado análisis de componentes independientes, ACI (Hyvärinen, 1999). Originalmente, este método ha sido utilizado para identificar señales falsas en magnetoencefalografías, para encontrar factores ocultos en datos financieros, así como para reducir el ruido en imágenes digitalizadas.

Se presenta la comparación del ACI con dos de los métodos de identificación de propiedades dinámicas más utilizados, el análisis espectral convencional, AEC (Bendat y Piersol 1986), y el de descomposición en el dominio de la frecuencia, DDF (Brinker et al. 2000). Se destacan las ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos para la identificación de las propiedades dinámicas.

Para la comparación de los métodos se utilizaron los datos de un marco plano de cuatro pisos propuesto en la literatura, los de un modelo tridimensional de cuatro pisos y las señales obtenidas de una medición de vibración ambiental de un edificio de concreto de siete pisos ubicado en la ciudad de México para comparar los resultados y así demostrar que el método ACI resulta una opción para el procesamiento y obtención de propiedades dinámicas en estructuras.

1.2 ESTADO DEL ARTE

El interés en el comportamiento dinámico de las estructuras comenzó en los años 30's junto con el creciente interés en la importancia del comportamiento dinámico de las aeronaves. Los medios tecnológicos en ese tiempo eran muy restringidos y la única medición viable estaba basada en la vibración libre de las extremidades de las alas de un avión, donde, por medio de un dispositivo de grabación se trazó la curva de decaimiento de vibración. Utilizando un vibrador para excitar la estructura este permitía al sistema entrar en resonancia.

De estos registros fue posible obtener el periodo natural fundamental y el porcentaje de amortiguamiento. Más adelante se empezó a usar diferentes vibraciones, con el objetivo de poner en resonancia las alas para identificar cada periodo de resonancia así como su modo.

Durante los 60's con el desarrollo del algoritmo de la transformada rápida de Fourier se dio un gran paso adelante; señales en el tiempo podían ser procesadas de manera mucho más rápida, permitiendo la conversión al dominio de la frecuencia y de regreso al dominio del tiempo. El desarrollo de computadoras digitales durante los 70's explotaron de manera importante dicho algoritmo y se generó un partaguas en pruebas y análisis dinámicos de estructuras.

1.2.1 Clasificación de técnicas de identificación

En la práctica, se puede medir la respuesta dinámica en condiciones de vibración libre o forzada, es decir, los datos del decaimiento libre o la respuesta forzada debido a una carga externa. En caso de contar con una carga externa, esta puede ser desconocida o muy difícil de cuantificar, por lo que solamente se mide la respuesta. Sin embargo, en caso de ser posible determinar la excitación o controlarla entonces la relación entre ambas puede ser medida.

De estas respuestas, se tienen, las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) si se está trabajando en el dominio de la frecuencia; las funciones de impulso-respuesta (FIR) se obtienen al trabajar en el dominio del tiempo.

Así se tienen métodos de identificación que utilizan datos en el dominio del tiempo y los que los utilizan en el dominio de la frecuencia. Los primeros pueden ser utilizados, ya sea para respuesta libre o forzada (conociendo o desconociendo las fuerzas). Los métodos en el dominio de la frecuencia sólo pueden ser utilizados para vibración forzada cuando se conocen las fuerzas que lo provocan.

Otra clasificación se basa en el número de datos de entrada y salida. En cada dominio existen métodos que utilizan datos de la respuesta ubicada en un punto y otros que simultáneamente utilizan datos obtenidos en varios puntos. En cada uno de los casos puede haber un solo punto o varios en donde se aplica la excitación;

- Una respuesta con una fuerza (UEUS) una-entrada una-salida.
- Varias respuestas con una fuerza (UEMS) una-entrada múltiples-salidas.
- Varias respuestas con varias fuerzas (MEMS) múltiples-entradas múltiples-salidas.
- Una respuesta con varias fuerzas (MEUS) múltiples-entradas una-salida.
- Una respuesta sin fuerzas (US) una salida-no entradas.

En el dominio del tiempo, las respuestas naturalmente procesan información sobre la frecuencia, sin embargo, esta se encuentra “escondida” por lo que no es posible (o por lo menos no es fácil) decir con cuántos periodos de vibración se llega a trabajar. Como consecuencia, los métodos en el dominio del tiempo simultáneamente identifican periodos de vibración de las estructuras y para los métodos MEMS varios modos de vibración y son conocidos como métodos de múltiples grados de libertad (MGL). En el dominio de la frecuencia, debido a que los picos de resonancia también son visibles es posible realizar la identificación modo por modo. Esos métodos son llamados de un grado de libertad (UGL).

Otra clasificación basada en el tipo de identificación de propiedades es: métodos directos e indirectos. Los primeros determinan las propiedades dinámicas en términos de rigidez, masa y amortiguamiento; los métodos indirectos evalúan las propiedades asociadas a cada modo de vibración con base en la frecuencia natural del sistema, amplitud y fase.

1.2.2 Descripción de métodos de identificación

Hasta los años 70's la primer gran contribución fue el trabajo de Kennedy y Pancu (1947). Quienes se dieron cuenta de que las zonas de resonancia pueden ser realizadas representando la respuesta de la frecuencia en función de un plano complejo (diagrama de Nyquist). Alrededor de cada frecuencia natural, el diagrama se aproxima más a una forma circular y, para sistemas de un grado de libertad, la forma es exactamente circular. No sólo esto muestra claramente la existencia de una frecuencia del sistema, si no permite calcular las propiedades dinámicas asociados a cada una de las frecuencias, este método ha sido mejorado en el transcurso de los años y es conocido como el método de ajuste circular (Kennedy y Pancu 1947).

Al término de los años 60's se propuso un método que trabaja en el dominio del tiempo denominado método autorregresivo de la media móvil ARMA propuesto por Finch (1960) y perfeccionado por Andersen (1997), este método en origen es un UEUS. El comportamiento de un sistema lineal, con una entrada y una salida, puede ser descrito por una ecuación diferencial con intervalos de tiempos constantes con dos incógnitas. Estas serían, una media variable y los parámetros autorregresivos, utilizando el número suficiente de muestras, una función cuadrática de error puede ser definida y minimizada para obtener los valores de las incógnitas y así obtener los modos del sistema.

Variaciones del ARMA para múltiples entradas y salidas es el llamado método autorregresivo de la media móvil con variables exógenas (ARMAX) propuesto por Anderson y Taylor y el método del vector autorregresivo de la media móvil ARMAV (Anderson y Taylor 1976) en donde los valores son considerados matrices.

El método exponencial complejo (EC) es de los métodos más importantes generado en el dominio del tiempo para UEUS aparece en 1970 (Spitznogle y Quazi, 1970). Se basa en funciones de impulso-respuesta (FIR) donde se tiene un número igual de intervalos representados por pares de complejos conjugados. Así generando un polinomio con coeficientes reales se puede obtener las frecuencias naturales y el amortiguamiento.

Una variación del EC para UEMS es el método exponencial complejo de los mínimos cuadrados (ECMC) introducido por Brown et al. (1979). Simultáneamente utiliza varias funciones de impulso respuesta obtenidas al excitar una estructura en un solo punto y obtener lecturas en varios puntos. Este procedimiento genera un conjunto de parámetros globales (frecuencias naturales y factores de amortiguamiento) lo que produce mejores resultados respecto a utilizar las funciones impulso respuesta de manera individual utilizando el EC.

Una versión MEMS de los métodos anteriores conocida como método exponencial complejo, con múltiples referencias (ECMR) fue desarrollado por Vold y Rocklin (1982) y contiene información no sólo de varios puntos de salida, si no, también de varios puntos de entrada dentro de la estructura (Vold & Rocklin 1982). Este no sólo resultó ser una forma más general y automática del análisis dinámico sino que también ayudó a resolver el problema de la probabilidad de que un modo de la estructura no sea excitado debido a que el punto de salida se localice cercano a un nodo.

En 1973 Ibrahim y Mikulcik propusieron un método en el dominio del tiempo (Ibrahim & Mikulcik 1973), que después sería llamado el método en el dominio de la frecuencia de Ibrahim. Es un método UEMS que utiliza respuestas libres de aceleración en lugar de funciones de impulso-respuesta. Donde se supone que las respuestas individuales se componen de un vector característico complejo para un número de respuestas en intervalos de tiempo constantes, obteniendo las propiedades dinámicas generando los vectores y valores característicos.

El método de identificación de parámetros de sistemas estructurales (IPSE) es un ejemplo de un MEMS directo en el dominio de la frecuencia. Fue desarrollado en 1978 por Link & Vollan (1978). Toma la respuesta del modelo de funciones de respuesta en frecuencia y directamente evalúa las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento.

El MGL UEUS más simple en el dominio de la frecuencia es el método Ewins-Gleeson (Ewins y Gleeson, 1982). Está diseñado para estructuras ligeramente amortiguadas por lo que los picos de las funciones de respuesta en el dominio de la frecuencia resultan ser altamente afilados y son muy fáciles de identificar.

Dobson (1987) presentó un método para un grado de libertad en el dominio de la frecuencia que automáticamente incluye la contribución del vecindario de los modos identificados.

1.3 OBJETIVOS

En el presente trabajo se comparan tres métodos de análisis de señales para la obtención de las propiedades dinámicas de estructuras (periodos y formas modales). Se presentan los porcentajes de error relativos a datos teóricos, de un marco bidimensional y uno tridimensional.

En el capítulo 1 se presenta el estado del arte de los métodos de identificación de propiedades dinámicas y el objetivo de obtenerlas para la detección de daño en los elementos estructurales; en el capítulo 2 se presentan de manera general los aspectos necesarios para la obtención y procesamiento de señales para poder aplicar a estas los distintos métodos de identificación de propiedades dinámicas, así mismo se presenta un método para la obtención del periodo fundamental del suelo.

En el capítulo 3 se presenta el marco teórico de los métodos que se comparan en este estudio.

En el Capítulo 4 se presenta la aplicación de los métodos a los registros obtenidos de un marco teórico bidimensional, un marco tridimensional, así como, a los datos obtenidos de una prueba de vibración ambiental realizada en un edificio de concreto de siete pisos localizado en la ciudad de México.

Las conclusiones obtenidas de los resultados de los capítulos anteriores se resumen y sintetizan en el Capítulo 5 para finalizar con las recomendaciones y el trabajo que se pudiese realizar a futuro.

CAPÍTULO 2

OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES

2.1 PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

2.1.1 Introducción

La vibración ambiental se basa en el hecho de que todas las estructuras se encuentran en constante movimiento dado que existe el paso de personas, vehículos, o incluso viento que excitan al inmueble.

La instrumentación permanente es una manera de dar seguimiento a las características dinámicas de las estructuras. Consiste en tener sensores instalados sobre la estructura para realizar mediciones que son enviadas a un centro de procesamiento. Sin embargo, el costo de instalación y mantenimiento de estos sensores, así como los medios de transporte de información (cableado) pueden llegar a ser muy elevados. Por desgracia, debido a lo anterior, la instrumentación permanente de estructuras resulta ser una tecnología muy poco utilizada en México.

Por lo anterior se han desarrollado procesos para poder conocer el comportamiento de las estructuras sin la necesidad de tener una instrumentación permanente. Este es el caso de realizar pruebas de vibración ambiental, las cuales no substituyen la instrumentación, pero pueden proveer datos suficientes para conocer el comportamiento de una estructura.

Estas pruebas consisten en medir las vibraciones de las estructuras, producidas por excitaciones de carácter ambiental (empuje del viento, tránsito de vehículos, etc.) por un periodo de tiempo determinado.

Para el registro de las vibraciones ambientales se utilizan sensores conocidos como servo-acelerómetros. Estos permiten tener la lectura de la respuesta de la estructura debido a las vibraciones mencionadas. Idealmente, para poder conocer la respuesta total de la estructura sería necesario colocar sensores en todos los pisos y en una ubicación específica para obtener un registro global. Sin embargo, esto puede llegar a ser impráctico o con un costo muy elevado. Por lo que previamente se debe realizar un análisis de la estructura y determinar cuál es la ubicación óptima de los sensores para poder tener una perspectiva más completa de la misma.

2.1.2 Herramientas de instrumentación

Existen diversos instrumentos de medición de aceleraciones, su elección depende de la exactitud y precisión requerida.

Para realizar una prueba de vibración ambiental, las características físicas que se necesitan medir son las aceleraciones que se generan en la estructura, aunque también se puede trabajar con datos de velocidad o desplazamiento.

Una de las herramientas más utilizadas son los servo – acelerómetros. Son transductores electromecánicos que se utilizan para medir aceleraciones absolutas de traslación. Están compuesto

por un péndulo que, al estar sometido a una aceleración de traslación en la dirección sensible, es percibido por el detector de posición y el servo amplificador genera una corriente eléctrica directamente proporcional a la aceleración de entrada, que sirve para balancear la fuerza inercial y restaurar la posición inicial del péndulo y a su vez para lograr una señal de salida de voltaje para su registro (figura 2.1).

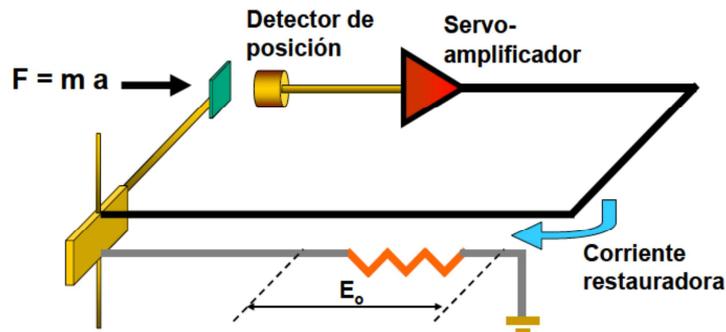


Figura 2.1 Diagrama de un acelerómetro

2.1.3 Instrumentación de estructuras

Existen diferentes métodos para determinar la ubicación de sensores dentro de una estructura para identificar sus propiedades dinámicas. Esto es debido a que el número de sensores resulta limitado por su costo e instalación, por lo que resulta de suma importancia contar con una metodología para determinar su ubicación óptima.

De acuerdo con Gawronski (1996), la ubicación de sensores puede establecerse a través de métodos basados en utilizar la información disponible de la estructura y en el desempeño estructural requerido. La información preliminar de las propiedades de la estructura se obtiene, generalmente, de un modelo. El desempeño de la misma se mide a través de desplazamientos o aceleraciones en diferentes ubicaciones.

En general los métodos se basan en determinar la norma del nivel de participación de cada sensor en la medición de la respuesta del sistema de acuerdo con los modos seleccionados para estudiar y, finalmente enumerarlas por importancia.

Sin embargo, generalmente la ubicación de los sensores se realiza dependiendo de la experiencia del encargado de efectuar la prueba de vibración, dependiendo de las características que se busquen.

2.2 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

2.2.1 Filtros

Al realizar pruebas de vibración en estructuras es posible obtener señales que pueden estar afectadas por diversas causas, como son: eventos aislados, ruido de la estructura, ruido del sensor, etc. Así es posible generar resultados incorrectos. Por lo anterior es importante realizar un tratamiento a las señales para poder encontrar los datos que transmitan el comportamiento de la estructura.

Para poder eliminar las causas que alteran las señales emitidas por la estructura, es necesario filtrarlas. Para ello se pueden utilizar filtros paso bajas, paso altas, paso banda, para banda, etc (Mallat, 1989).

2.2.2 Función compleja indicadora de modos (FCIM)

Al realizar una prueba de vibración ambiental, es posible que no se cuente con los elementos necesarios para realizar el registro de datos en todos los pisos o en todas las zonas de interés en el mismo intervalo de tiempo, ya sea por falta de equipo o de personal. Lo anterior tiene como resultado hacer un gran número de mediciones en distintos intervalos de tiempo. Con ello se genera la cuestión de qué registro utilizar para aplicar los métodos de identificación de propiedades dinámicas o si se deben utilizar todos los obtenidos. Sin embargo, en ocasiones son tantos los registros obtenidos que resulta impráctico trabajar con todos ellos.

La FCIM (Shih, 1989) permite sintetizar, en uno, los registros obtenidos en distintos intervalos de tiempo.

A continuación se presenta los principios en los que se basa el método de la FCIM:

Si se considera que la función de respuesta en el dominio de la frecuencia (FRF) describe las múltiples entradas o salidas con relación a la estructura. En el área del análisis modal suponiendo sistemas lineales, la matriz de respuesta en el dominio de la frecuencia de N grados de libertad puede ser expresada como:

$$[H(j\omega)] = \sum_{r=1}^{2N} \frac{[A_r]}{j\omega - \lambda_r} = \sum_{r=1}^{2N} \frac{Q_r \{\phi\}_r \{L\}_r^H}{(j\omega - \lambda_r)} \quad (2.1)$$

O en forma matricial:

$$[H(j\omega)] = [\Phi] \left[\frac{Q_r}{(j\omega - \lambda_r)} \right] [L] \quad (2.2)$$

donde:

N_0 es el número de puntos de las respuestas.

N_i es el número de puntos de la excitación.

$[H(j\omega)]$ es la matriz FRF de tamaño N_0 por N_i .

$[A_r]$ es la r -ésima matriz de residuos de tamaño N_0 por N_i .

$\{\phi\}_r$ es la r -ésima forma modal de tamaño N_0 por 1.

$\{L\}_r$ es el r -ésimo factor de participación modal de tamaño N_1 por 1.

$[\Phi]$ es la matriz de formas modales de tamaño N_0 por $2N$.

$[L]$ es la matriz de factores de participación modal de tamaño N_i por $2N$.

Q_r es el factor de escala para el r -ésimo modo.

λ_r es el valor inicial del r -ésimo modo.

Al aplicar la descomposición de valores singulares de la matriz de FRF, se obtiene una expresión similar a la (2.2):

$$[H(j\omega)] = [U(j\omega)][\Sigma(j\omega)][V(j\omega)]^H \quad (2.3)$$

donde:

N_r es el número de modos dominantes. Son los modos que contribuyen a la respuesta de la estructura en la frecuencia particular $j\omega$.

$[U(j\omega)]$ es la matriz singular izquierda de tamaño N_0 por N_r , que es una matriz unitaria.

$[\Sigma(j\omega)]$ es la matriz de valores singulares de tamaño N_r por N_r , que es una matriz diagonal.

$[V(j\omega)]$ es la matriz singular derecha de tamaño N_0 por N_r , que es una matriz unitaria.

Las formas modales y los factores de participación modal en la ecuación (2.2) son escalados para obtener vectores unitarios. También, para simplificar, la matriz de masas en la ecuación (2.3) se supone como una matriz identidad, así, la ortogonalidad de los vectores modales aún se satisface.

El número de puntos de entrada (puntos de referencia), N_i , es menor que el número de puntos de respuesta, N_0 . En la ecuación (2.3), si el número de modos dominantes es menor o igual que la menor dimensión de la matriz FRF, es decir, $N_r \leq N_i$, la descomposición de valores singulares lleva a las formas modales (vector singular izquierdo) y a los factores de participación modal (vector singular derecho). El valor singular es equivalente al factor de escala dividido entre la distancia entre la frecuencia de muestreo y el valor inicial de frecuencia.

La FCIM es definida como la solución de los valores característicos para la matriz normal, la cual es formada de la matriz FRF en cada línea espectral, $[H(j\omega)]^H [H(j\omega)]$. Con esta definición, la FCIM es igual al cuadrado de las magnitudes de los valores singulares.

$$FCIM_k(j\omega) \equiv \mu_k(j\omega) = \sigma_k^2(j\omega) \rightarrow k = 1, 2, \dots, N_r \quad (2.4)$$

y

$$[H(j\omega)]^H [H(j\omega)] = [V(j\omega)][\Sigma^2(j\omega)][V(j\omega)]^H \quad (2.5)$$

donde:

$FCIM_k(j\omega)$ es el k -ésimo FCIM en la frecuencia ω .

$\mu_k(j\omega)$ es el k -ésimo valor característico de la matriz normal de la matriz FRF en la frecuencia ω .

$\sigma_k(j\omega)$ es el k -ésimo valor singular de la matriz FRF en la frecuencia ω .

De manera práctica, la matriz normal es formada por la matriz FRF, $[H(j\omega)]^H [H(j\omega)]$ calculada en cada línea espectral; así, son obtenidos los valores característicos de la matriz, los cuales quedan sintetizados en un registro, permitiendo así obtener un solo registro que contenga la información de cada uno de los registros originales.

2.3 OBTENCIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL SUELO

En los modelos teóricos es importante conocer el periodo de la excitación para descartar los periodos al momento de identificar los correspondientes a las estructuras. En el caso de mediciones reales resulta complicado conocer las características de la excitación. Sin embargo, otro valor que puede resultar de utilidad es el periodo dominante del suelo. Esto no solo para la identificación de propiedades dinámicas, sino también al diseñar una estructura, ya que se buscará que su periodo fundamental no esté cercano al dominante del suelo por que podría entrar en resonancia.

En 1989, Nakamura propuso una técnica para identificar el periodo dominante del suelo utilizando registros obtenidos por mediciones de vibración ambiental. Estas mediciones deben de incluir registros en dos direcciones horizontales y una en dirección vertical. Propone un procedimiento aproximado para eliminar las frecuencias de la fuente de excitación de la vibración ambiental, basada en la modificación de la función de transferencia convencional de un sitio. Nakamura establece que la vibración generada por fuentes locales genera ondas Rayleigh, que influyen tanto los movimientos horizontales como verticales en la superficie. Bajo estas condiciones, los efectos de amplificación vertical debida a la fuente local se definen por:

$$E_s = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2.6)$$

donde S_{VS} y S_{VB} corresponden a las ordenadas espectrales en el dominio de la frecuencia de los movimientos verticales en la superficie de la estructura, la cual puede ser en cualquier punto dentro de la estructura, y en la base de la estructura. La función de transferencia de un sitio S_T , se define como:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (2.7)$$

donde S_{HS} y S_{HB} son las ordenadas espectrales de los movimientos horizontales en la superficie y en la base de la estructura respectivamente. Los efectos de la fuente de excitación son compensados al dividir S_T entre E_s obteniendo así la función de transferencia modificada, S_{TT} , para el sitio:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_s} = \frac{R_s}{R_B} \quad (2.8)$$

donde $R_s = S_{HS} / S_{VS}$ y $R_B = S_{HB} / S_{VB}$. De acuerdo a Nakamura $R_B \approx 1.0$ para la mayor parte de los periodos que en cuanto a la ingeniería importan. Así, la función de transferencia modificada está

definida sólo por R_S , la cual puede ser determinada a partir de registros de superficie, lo que implica que la función de transferencia quedaría definida de la siguiente manera:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (2.9)$$

A continuación se presenta gráficamente un ejemplo;

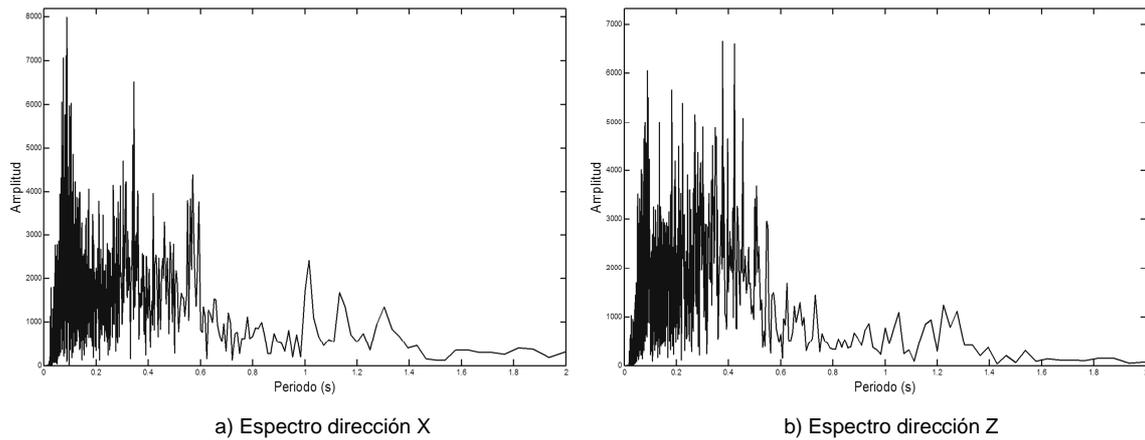


Figura 2.2 Espectros horizontal y vertical en el terreno

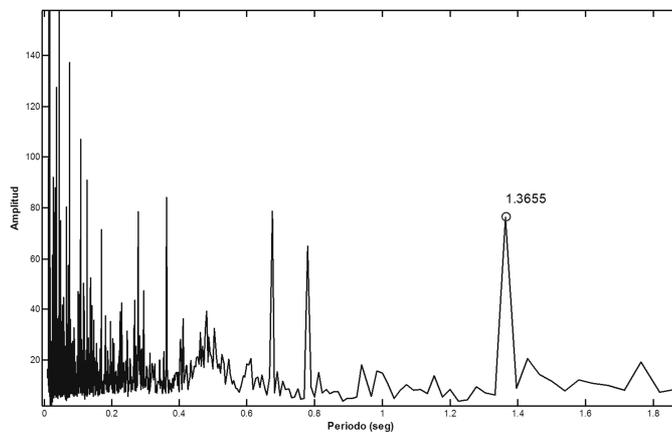


Figura 2.3 Función de transferencia entre ordenadas espectrales horizontal y vertical

En la función de transferencia se identificará el pico correspondiente al periodo de mayor magnitud, cuyo valor proporcionará el periodo dominante del suelo, en este caso un periodo de 1.3655 s

CAPÍTULO 3

BASES DE IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS

3.1 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS

3.1.1 Análisis espectral convencional (AEC)

El análisis espectral convencional (Bendat y Piersol, 1986) es un método de análisis de la respuesta de una estructura basado en la obtención de señales generadas en el dominio del tiempo que deben ser transformadas al dominio de la frecuencia por medio de la transformada de Fourier. A continuación se presenta el diagrama de flujo el método:

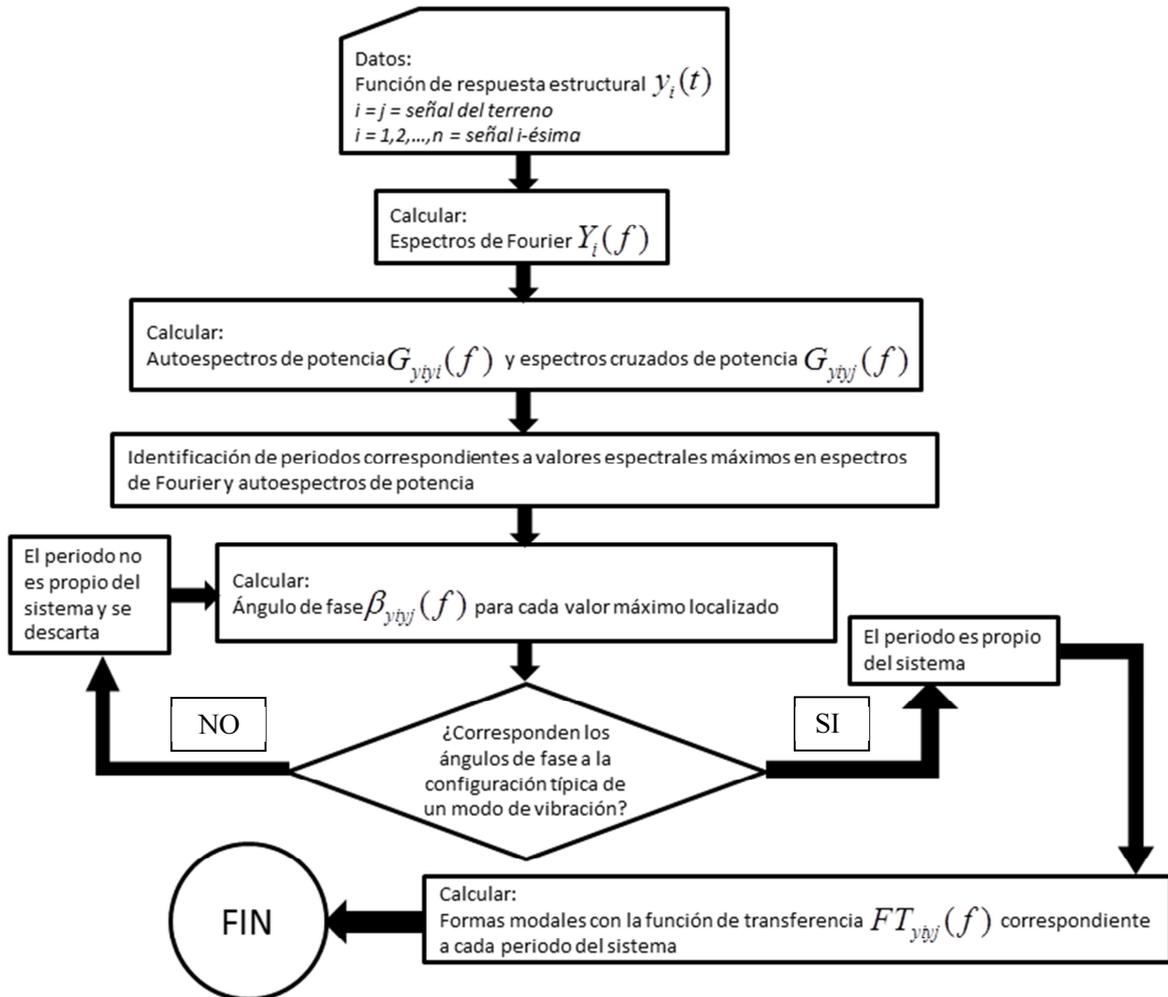


Figura 3.1 Diagrama de flujo método análisis espectral convencional

3.1.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia (DDF)

El método de descomposición en el dominio de la frecuencia (Brincker 2000) se basa en la descomposición de valores singulares, de las matrices espectrales de potencia de la respuesta, para la identificación y obtención de periodos y formas modales. Se presenta el diagrama de flujo del método:

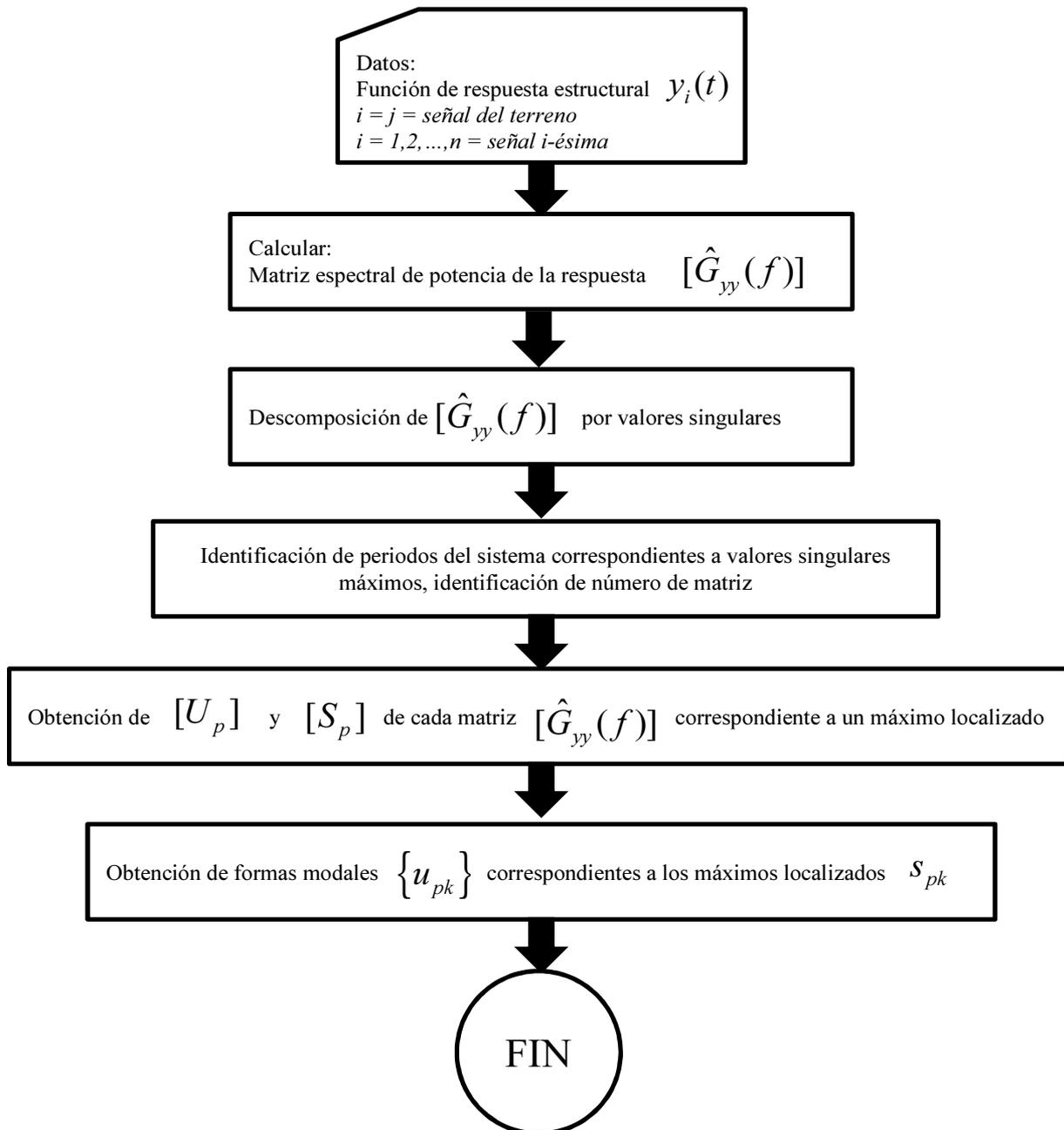


Figura 3.2 Diagrama de flujo método descomposición en el dominio de la frecuencia

3.1.3 Análisis de componentes independientes (ACI)

En el método de análisis de componentes independientes ACI propuesto por Jutten y Héroult en 1991, Comon 1994 dice que, suponiendo que se cuente con n mezclas lineales x_1, \dots, x_n , estas estarán formadas por m términos independientes s_1, \dots, s_m , cuya contribución está dada por elementos de peso a_1, \dots, a_n , tal que:

$$x_j = a_{j1}s_1 + a_{j2}s_2 + \dots + a_{jm}s_m \quad \forall j \quad (2.10)$$

Dichas mezclas pueden ser señales que varían con el tiempo $x(t), t = 1, 2, \dots$ donde los términos independientes $s_m(t)$ serán considerados fuentes de las señales. Así el ACI propone identificar los m términos independientes s (fuentes) conociendo las n mezclas x (respuestas), por medio de un canal de mezclado a (Hyvärinen, 1999).

Matricialmente, el vector x contendrá los elementos considerados como las mezclas x_1, \dots, x_n , s será el vector que contenga los términos s_1, \dots, s_m que serán las fuentes. Llamando A a la matriz que contendrá los elementos a_{ij} . Si las letras minúsculas indican vectores y las mayúsculas matrices, los vectores se supondrán como vectores columna, por lo que x^T indicaría un vector renglón. Utilizando la notación antes mencionada:

$$x = As \quad (2.11)$$

que también puede ser escrito como:

$$x = \sum_{i=1}^n a_i s_i \quad (2.12)$$

El punto de partida del método es la suposición de que los componentes del vector s son estadísticamente independientes. Así mismo, los componentes independientes deben de tener distribuciones no-Gaussianas. Por simplicidad, también se supone que la matriz de los elementos de peso es cuadrada. Así al estimar una matriz A realizando su inversa W se pueden obtener los valores de los términos independientes:

$$s = Wx \quad (2.13)$$

Para poder obtener los valores de las fuentes s es necesario conocer el vector x el cual será formado por los datos registrados.

A continuación se presenta el diagrama de flujo correspondiente al ACI:

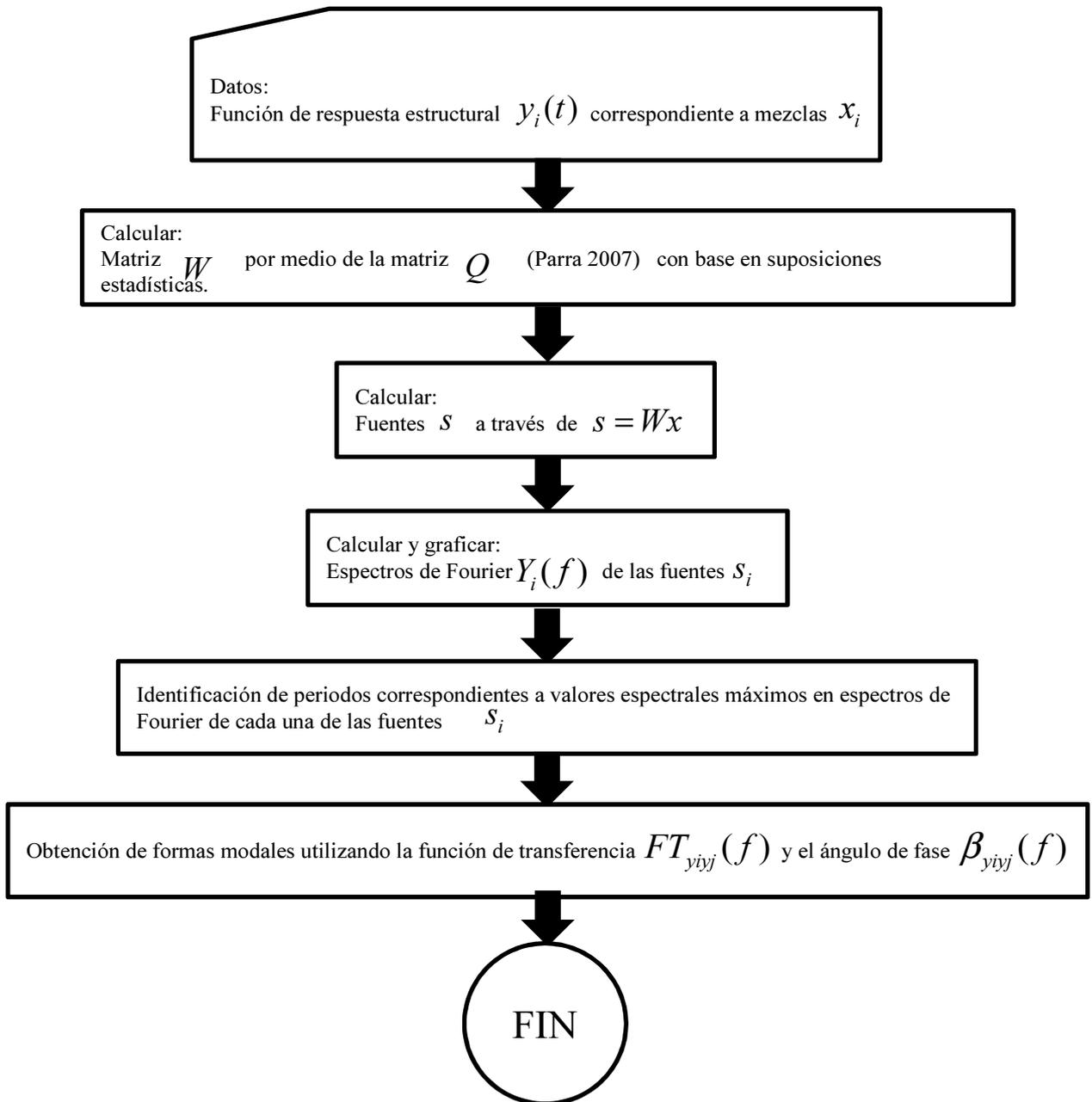


Figura 3.3 Diagrama de flujo método análisis de componentes independientes

3.2 CRITERIOS DE CORRELACIÓN DE FORMAS MODALES

A continuación se presentan tres métodos de correlación de formas modales, con el objetivo de contar con herramientas para determinar la precisión con la que al aplicar los distintos métodos de identificación de propiedades dinámicas se generan datos correspondientes a las formas modales de un sistema.

3.2.1 Criterio de correlación modal (CCM)

Uno de los métodos más utilizados para comparar modelos analíticos y casos experimentales es el criterio de correlación modal (Ewins 1984). Este permite medir la correlación o coherencia entre dos vectores modales esto es:

$$CCM(\{\varphi_X\}_i, \{\varphi_A\}_j) = \frac{|\{\varphi_X\}_i^T \{\varphi_A\}_j|^2}{(\{\varphi_X\}_i^T, \{\varphi_X\}_i)(\{\varphi_A\}_j^T, \{\varphi_A\}_j)} \quad (2.14)$$

donde $\{\varphi_X\}_i$ es el vector de la i -ésima forma modal de los datos analíticos y $\{\varphi_A\}_j$ el vector de la j -ésima forma modal de los datos obtenidos experimentalmente.

Los valores calculados varían entre 0 y 1. Los valores cercanos a 0 indican baja correlación entre los vectores y viceversa.

3.2.2 Criterio de correlación modal coordinado (CCMC)

Otro de los métodos utilizados para la cuantificación de errores es el criterio de correlación modal por coordenadas (Lieven y Ewis, 1988). El CCMC mide la correlación para cada grado de libertad y calcula un promedio de los pares correlacionados, esto es:

$$CCMC(i) = \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_{CMP}} |\varphi_A(i, j) \varphi_X(i, j)| \right)^2}{\sum_{j=1}^{n_{CMP}} |\varphi_A(i, j)|^2 \sum_{j=1}^{n_{CMP}} |\varphi_X(i, j)|^2} \quad (2.15)$$

donde $\varphi_X(i, j)$ es el valor de la i -ésima forma modal del j -ésimo nivel de los datos analíticos y $\varphi_A(i, j)$ es el valor de la i -ésima forma modal del j -ésimo nivel de los datos obtenidos experimentalmente.

Los valores calculados varían entre 0 y 1. Los valores cercanos a 0 indican baja correlación entre los vectores y viceversa.

3.2.3 Diferencia modal normalizada (DMN)

Este método cuantifica la exactitud de los datos modales sin utilizar las matrices del sistema como un error localizado para el modo en estudio. Físicamente, la DMN representa el valor por el cual cada grado de libertad (GDL) difiere de los dos modos que se correlacionan. Una aproximación del DMN es:

$$DMN \approx \sqrt{\frac{1 - CCM}{CCM}} \quad (2.16)$$

Los valores calculados varían entre 0 y 100%, los valores cercanos a 0% indican alta correlación entre los vectores.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE MÉTODOS

4.1 MODELO BIDIMENSIONAL

Para comparar los métodos descritos se estudia un marco plano de cuatro pisos (Bernal y Gunes, 2000).

Este marco se estudió con la finalidad de observar cómo los parámetros identificados de un sistema, por medio del algoritmo de comprensión de sistemas característicos mediante la identificación del filtro de Kalman, ERA-OKID, cambiaban al introducir la no linealidad al momento de obtener su respuesta.

4.1.1 Introducción

4.1.1.1 Propiedades físicas del modelo

Las propiedades del marco se muestran en la figura 4.1:

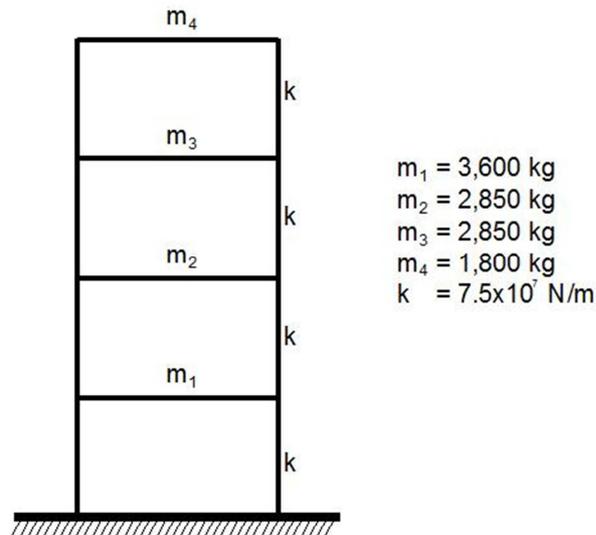


Figura 4.1 Propiedades físicas del marco teórico bidimensional

Con el propósito de generar un modelo en un programa de análisis estructural, en este caso ETABS, es necesario definir ciertas propiedades para poder reproducir la masa y rigidez propuestas inicialmente, tales como: geometría, materiales, secciones, cargas, etc.

La geometría propuesta es de una cruzía con un claro de 5.00 m y altura de entrepiso de 3.00 m en todos ellos.

Se consideró un material un módulo de elasticidad de los elementos estructurales $E = 2.04 \times 10^{10} \frac{kg}{cm^2}$

Para reproducir la rigidez en los elementos verticales, con base en el valor de módulo de elasticidad, la inercia de las columnas es $I_{columnas} = 4.1 \times 10^{-3} m^4$

Para representar las masas se omitió la participación del peso propio de los elementos, por lo que se recurrió a transformar la masa necesaria en cargas distribuidas que actuaran sobre cada uno de los pisos.

4.1.1.2 Obtención de registros

Con el fin de obtener registros del modelo en todos sus pisos es necesario aplicar una excitación en la base.

Se utilizó el sismo del 19 de septiembre de 1985 registrado en la ciudad de México en la Secretaria de comunicaciones y transportes en la dirección Este-Oeste (figura 4.2).

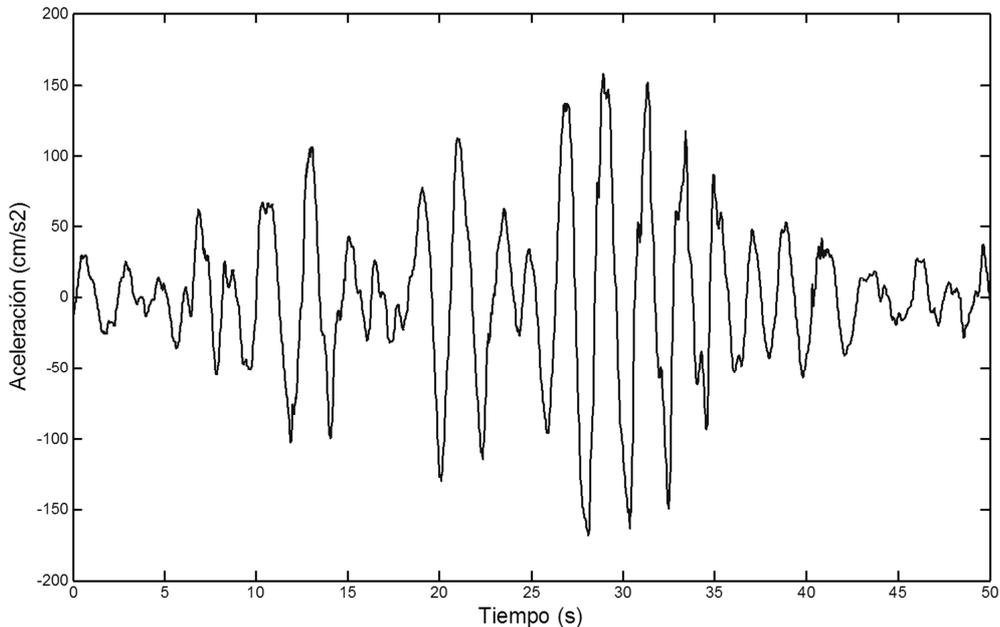


Figura 4.2 Registro de SCT 1985 dirección Este-Oeste

En la figura 4.3 se presenta el espectro de respuesta del registro de la figura 4.2, en dicho espectro se puede observar que se tiene un período dominante aproximado de 2.00 s. Al conocer los períodos teóricos del modelo buscando que el período dominante de la excitación, fuera cercano al fundamental

del modelo se puede escalar el registro, a 2,501 puntos con un diferencial de tiempo de 0.002 s para un total de 5.002 s.

Cuyo espectro de respuesta tiene un periodo dominante de aproximadamente 0.2 s, como se muestra en la figura 4.3.

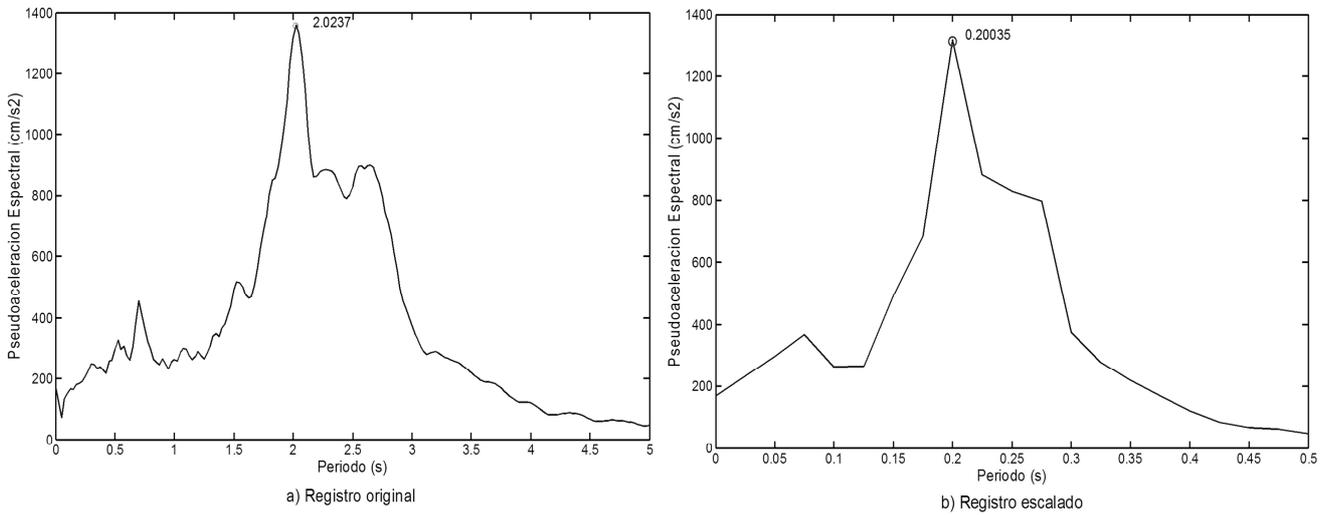


Figura 4.3 Espectros de respuesta registro SCT 1985

Al pasar al dominio de la frecuencia dentro de las respuestas de los pisos también se observarán máximos correspondientes a los periodos de la excitación. Es recomendable obtener el espectro de Fourier de la excitación para determinar cuáles son los periodos correspondientes y así, descartarlos al momento de elegir los periodos representativos del sistema.

En la figura 4.4 se muestra el espectro de Fourier de la excitación en la cual se señalan los periodos dominantes y se presenta el valor correspondiente.

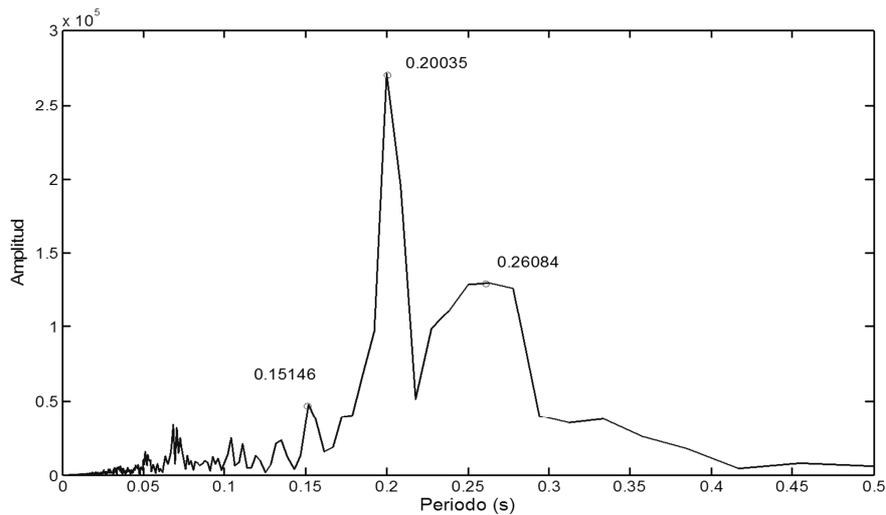


Figura 4.4 Espectro de Fourier de registro SCT 1985 escalado

Como se observa en la figura 4.4 se tienen tres máximos que sobresalen, los cuales ayudarán a identificar los máximos reales correspondientes a los periodos del marco. Estos son 0.151, 0.200 y 0.2608 s.

Al aplicar el registro al modelo se obtuvieron las respuestas dinámicas que se presentan en la figura 4.5:

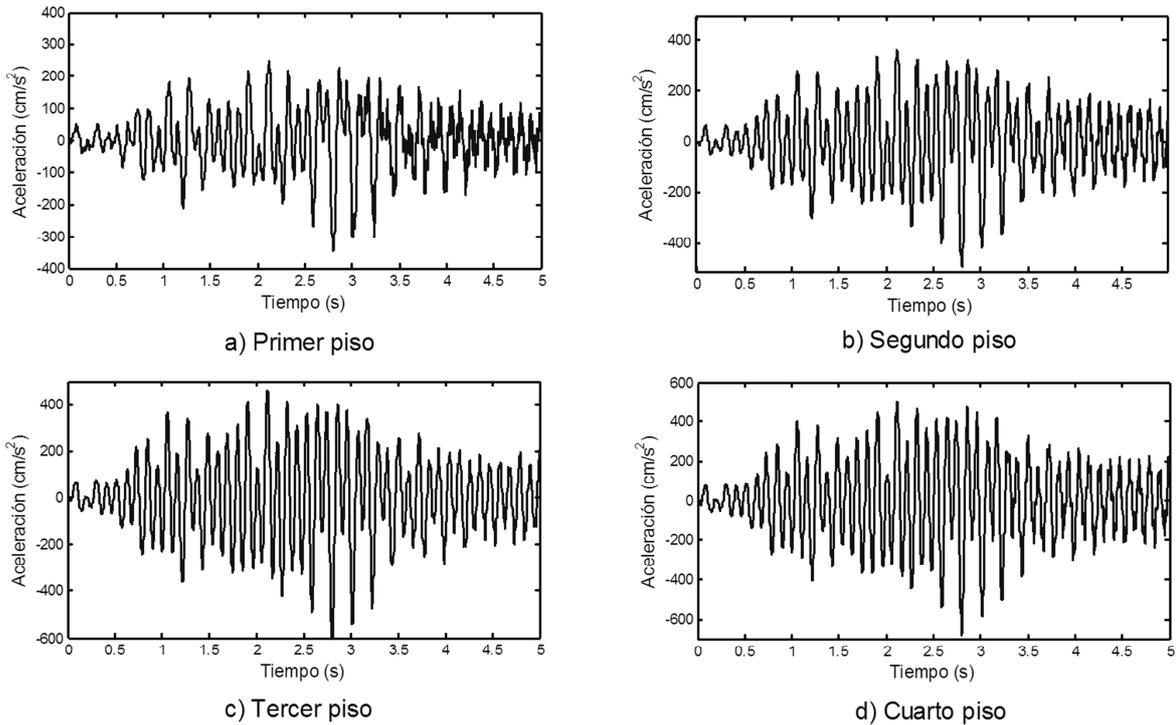


Figura 4.5 Respuesta dinámica registrada en los pisos del marco bidimensional

4.1.1.3 Propiedades dinámicas del modelo

Los periodos de vibración y la configuración de las formas modales se indican en la tabla 4.1, en el apéndice A se presenta la configuración de las cuatro formas modales del marco:

Tabla 4.1 Periodos y formas modales teóricos del marco bidimensional

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.1064	T2 = 0.0389	T3 = 0.0256	T4 = 0.0207
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.900	0.314	-0.521	-1.299
2	0.677	-0.686	-0.793	1.082
1	0.369	-0.975	0.826	-0.433

En la figura 4.6 se presenta la configuración de las formas modales normalizadas con respecto del cuarto piso.

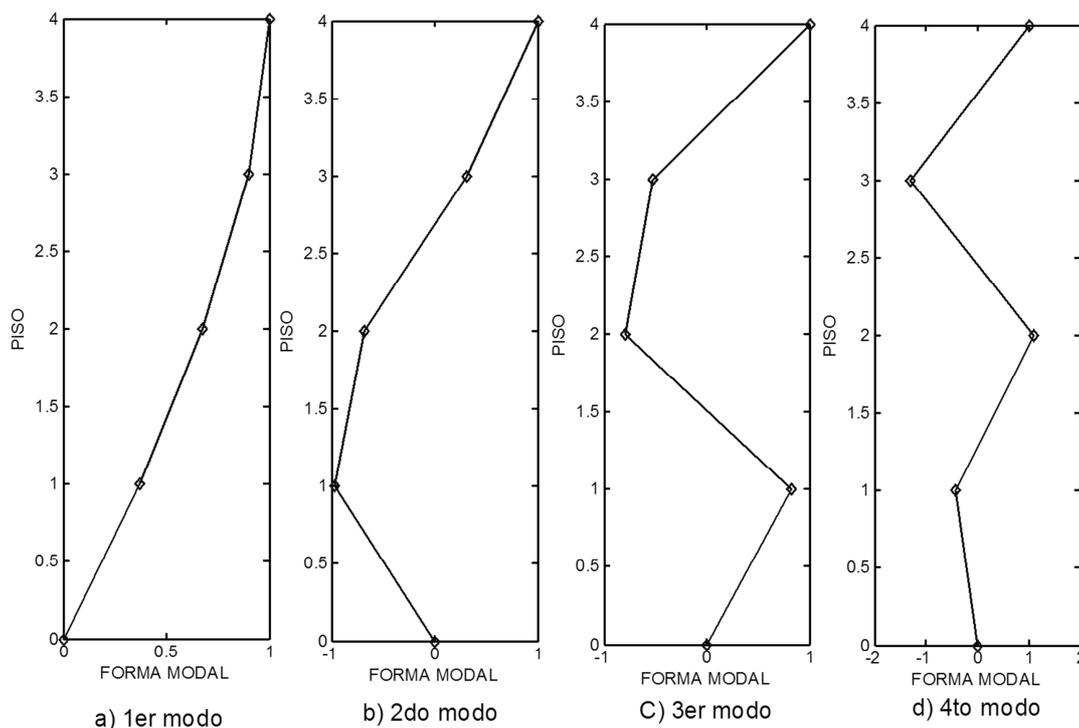


Figura 4.6 Configuración de las formas modales del modelo bidimensional

Los datos presentados en la tabla 4.1 se utilizaron para comparar los resultados al aplicar los tres métodos.

4.1.2 Aplicación de métodos

4.1.2.1 *Análisis espectral convencional*

Para la aplicación del AEC de acuerdo al diagrama de flujo (figura 3.1), es necesario, obtener los espectros de potencia de las respuestas dinámicas de cada uno de los pisos. Dichos espectros se generan por medio de los espectros de Fourier. Ambos se pueden utilizar para identificar los máximos espectrales.

En la figura 4.7 se muestran los espectros de Fourier de cada una de las respuestas registradas en los pisos de la estructura, y en la tabla 4.2 se muestran los máximos localizados en cada uno:

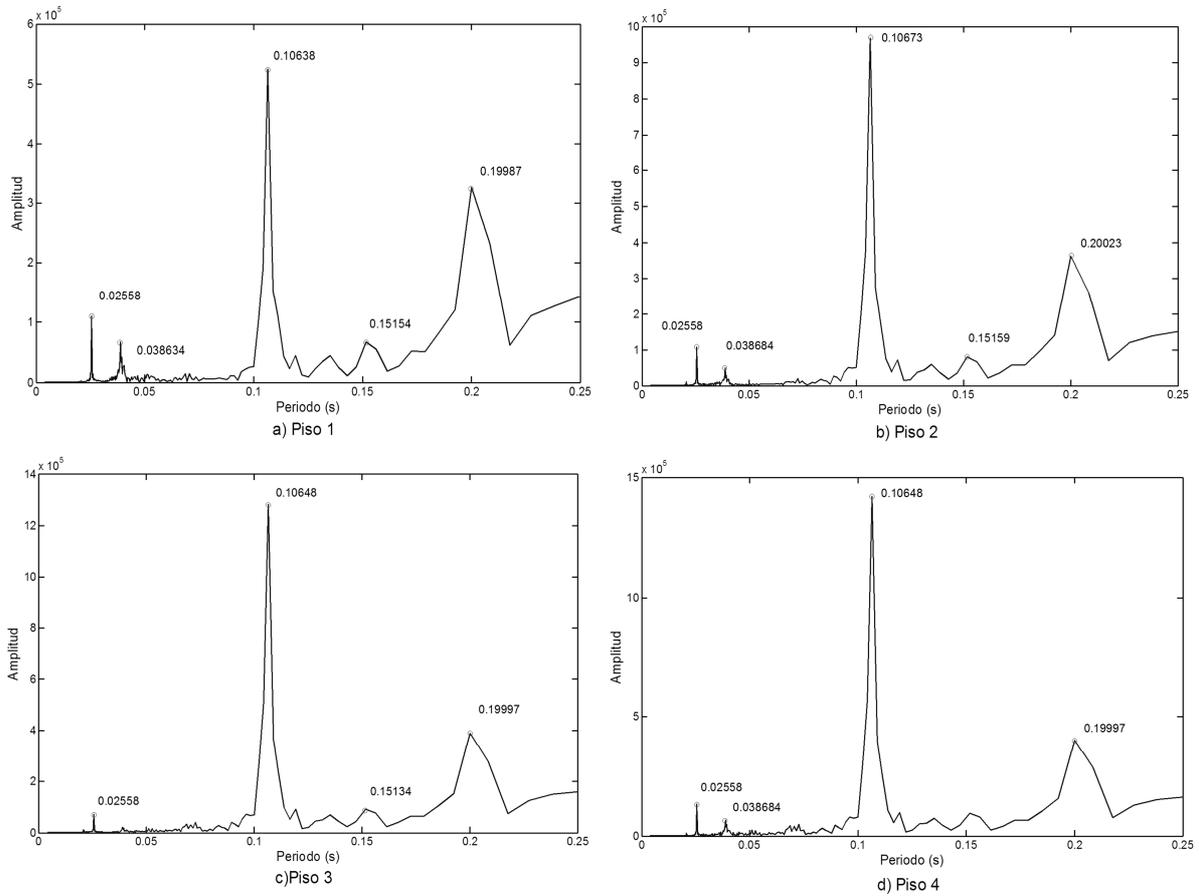


Figura 4.7 Espectros de Fourier de las respuestas dinámicas del modelo bidimensional

En los espectros anteriores se observa que existen máximos correspondientes a los periodos de la excitación a la cual fue sometida la estructura, por lo que es recomendable obtener el espectro de Fourier de la excitación para determinar cuáles son sus periodos y así descartarlos al elegir los periodos representativos de la estructura.

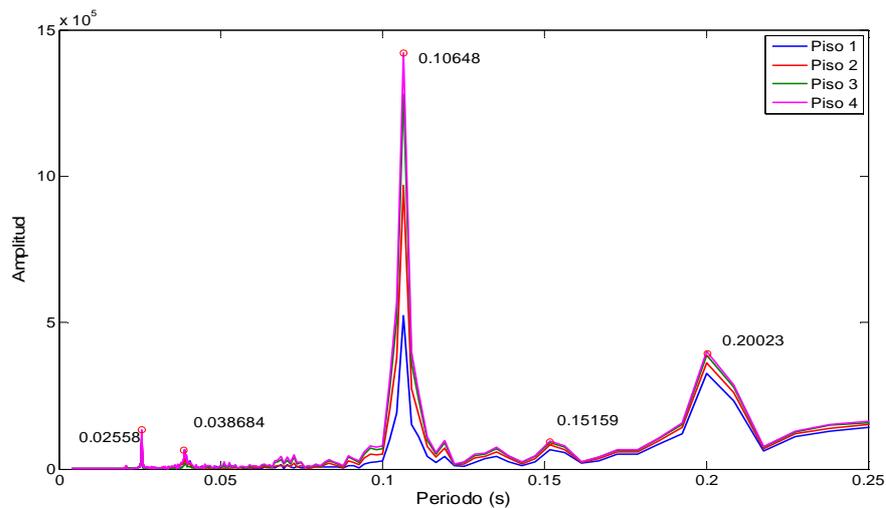


Figura 4.8 Espectro de Fourier de las respuestas de todos los pisos

En la figura 4.8 se presenta los espectros de Fourier de los registros de los pisos del marco, con el propósito de resaltar el hecho de que en cada uno de los registros se tiene información frecuencial de todo el sistema, lo que podría permitir identificar los periodos de vibración del sistema aunque no se cuente con registros en cada uno de los pisos.

Tabla 4.2 Periodos (s) localizados en espectros de Fourier

PISOS			
1	2	3	4
0.0256	0.0256	0.0256	0.0256
0.0386	0.0387		0.0387
0.1064	0.1067	0.1065	0.1065
0.1515	0.1516	0.1515	
0.1999	0.2002	0.2000	0.2000

Como se observa en las figuras 4.7 y 4.8, así como en la tabla 4.2 se localizaron alrededor de cinco máximos en la mayoría de los espectros de Fourier de los distintos pisos. Lo que indica que estos valores pueden ser los correspondientes a los periodos de la estructura. Sin embargo, siguiendo la metodología del AEC es necesario realizar una comparación con los valores de los espectros de potencia, en la figura 4.9 se presentan los autoespectros de cada uno de los pisos, en la tabla 4.3 se muestra un resumen de los valores de periodos correspondientes a los máximos localizados.

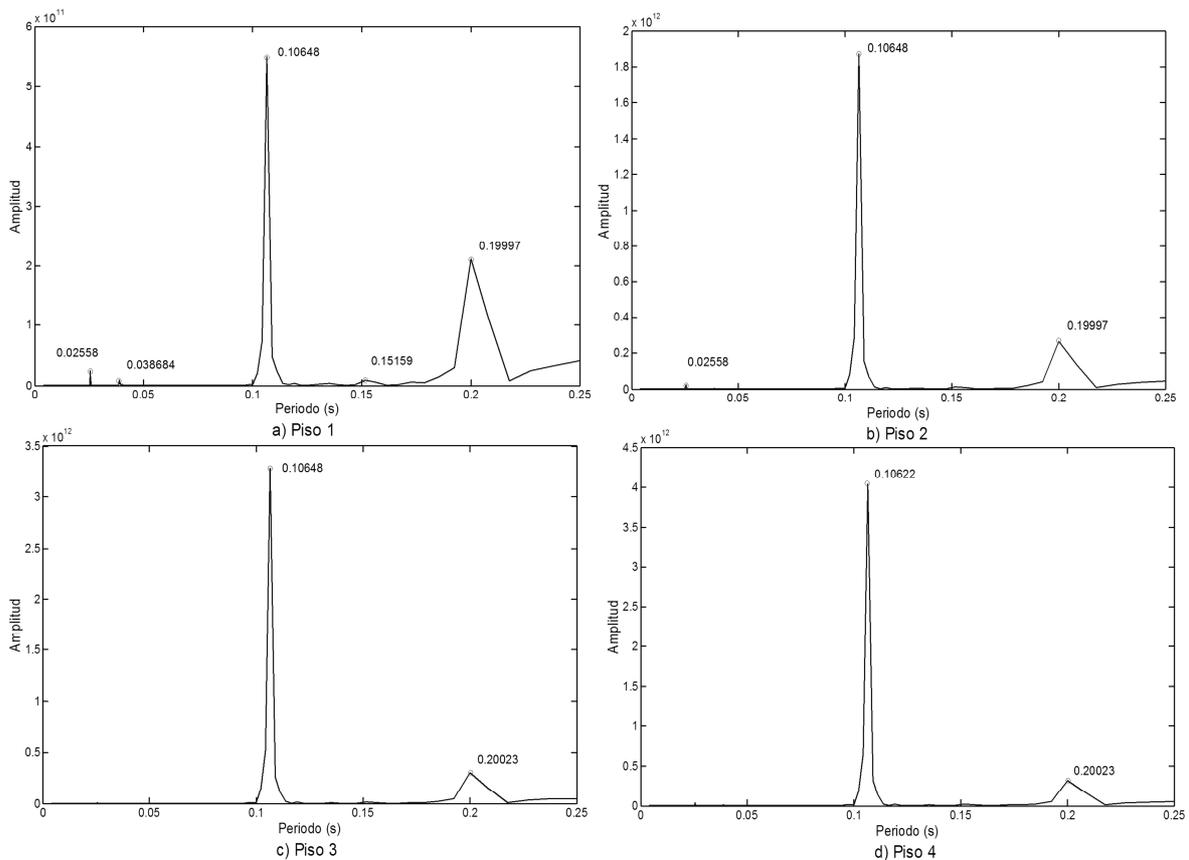


Figura 4.9 Autoespectros de potencia de las respuestas dinámicas del modelo bidimensional

Es importante resaltar el hecho de que dentro de los máximos localizados tanto en los espectros de Fourier así como en los autoespectros dos corresponden a los periodos de la excitación por lo que estos pueden ser descartados al momento de determinar los correspondientes al comportamiento del marco.

Tabla 4.3 Periodos (s) localizados en los autoespectros de potencia

PISO			
1	2	3	4
0.0256	0.0256		
0.0387			
0.1065	0.1065	0.1065	0.1062
0.1516			
0.2000	0.2000	0.2002	0.2002

Como se observa en la figura 4.9, la amplitud de los picos de amplificación es mayor que la correspondiente al mismo periodo en el espectro de Fourier, debido a que el autoespectro de potencia tiene como finalidad resaltar los picos con una amplitud de magnitud mayor y “eliminar” los picos con una amplitud menor. Es decir, los máximos los resalta y los picos “pequeños” los elimina.

Sin embargo, pueden existir ciertos picos “pequeños” en relación con otros que pueden llegar a ser eliminados. Lo anterior provocaría que fuera imposible identificar estos periodos.

Dentro de las figuras anteriores se observa que sólo existen dos periodos que se encuentran en todos los autoespectros, uno con el valor del periodo de la excitación de 0.200 s y el periodo correspondiente a 0.1062 s. Así, si sólo se utilizarán los autoespectros para identificar los periodos de la estructura se habría encontrado uno o dos de los cuatro periodos que se tienen en realidad.

En la figura 4.10 se muestra el espectro cruzado de potencia entre el terreno y el registro en los pisos:

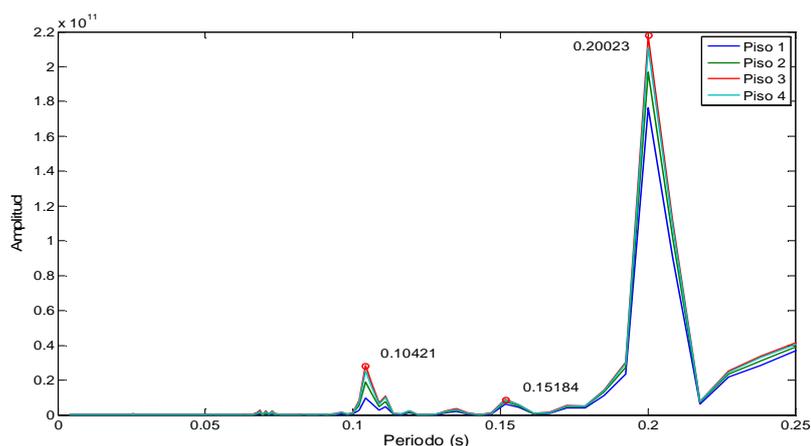


Figura 4.10 Espectro cruzado de potencia entre terreno y pisos modelo bidimensional

Los periodos localizados en el espectro cruzado de potencia (0.10421, 0.15184 y 0.20023 s) corresponden a los periodos de la excitación a la cual fue sometido el marco, esto se debe a que estos se encuentran reflejados en los registros de cada uno de los pisos, por lo que al realizar el espectro

cruzado con respecto al registro del terreno las amplitudes de los picos, correspondientes a los periodos de la excitación, se magnifican, por lo que los periodos propios de la estructura no son claramente representados en la gráfica de este espectro.

Después de observar los espectros de Fourier, los autoespectros de potencia y los espectros cruzados, se encontraron tres periodos distintos a los correspondientes a la excitación inducida a la estructura.

Con dichos periodos se continuará la aplicación del AEC para comprobar si estos son los periodos de vibración propios de la estructura. En caso de que alguno de estos no corresponda a un periodo de vibración de la estructura, es necesario regresar a las gráficas para seleccionar algún otro periodo que pueda ser considerado.

En caso de no poder identificar algún otro periodo se continuará con la metodología del AEC con los periodos restantes. En la tabla 4.4 se muestran los periodos seleccionados:

Tabla 4.4 Periodos de vibración seleccionados del modelo bidimensional

MÁXIMOS DEFINIDOS
PERIODO (s)
0.02558
0.03868
0.10648

Al final, sólo se identificaron tres periodos, por lo que uno de los cuatro periodos del marco no se pudo localizar. Al conocer que el valor teórico del periodo que no se encontró es de 0.0207 s, se muestra en la figura 4.11 una ampliación a la figura 4.8 para poder identificar si efectivamente en ese valor existe un máximo.

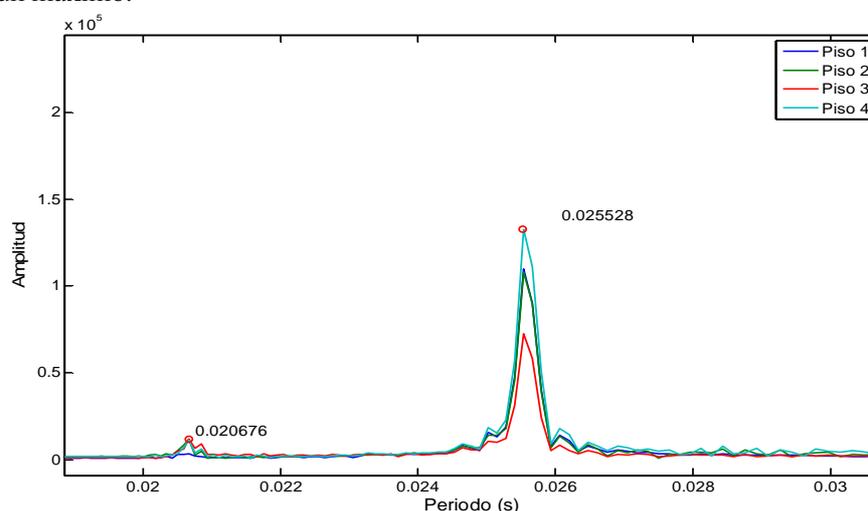


Figura 4.11 Ampliación espectros de Fourier de los pisos del modelo bidimensional

Como se puede observar en la figura 4.11, efectivamente se cuenta con un valor máximo en 0.02067 s. Sin embargo, este valor se pudo encontrar debido a que ya se conocían los periodos teóricos de la estructura. Si estos valores fueran desconocidos, habría sido imposible encontrarlo.

En la figura 4.12 se muestran los ángulos de fase para los valores de periodo comprendidos entre 0 y 0.12 s, intervalo en el cual se encuentran los periodos del marco modelado.

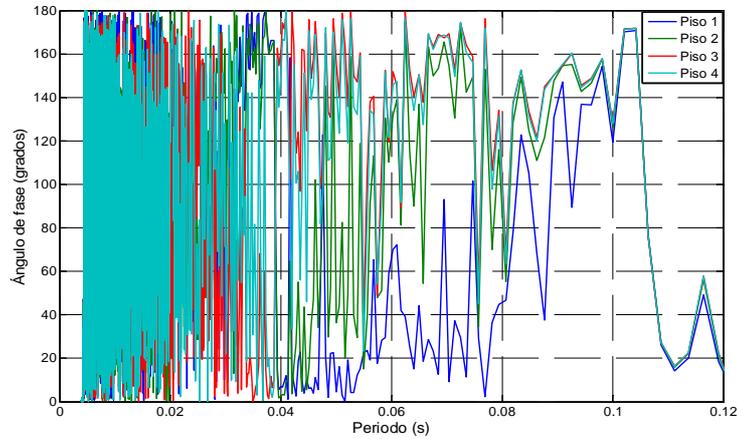


Figura 4.12 Ángulo de fase del espectro cruzado entre el terreno y pisos, modelo bidimensional

Considerando la dificultad de identificar valores en la figura 4.12 es necesario realizar un análisis más detallado utilizando la información de los periodos localizados que se encuentra en la tabla 4.4.

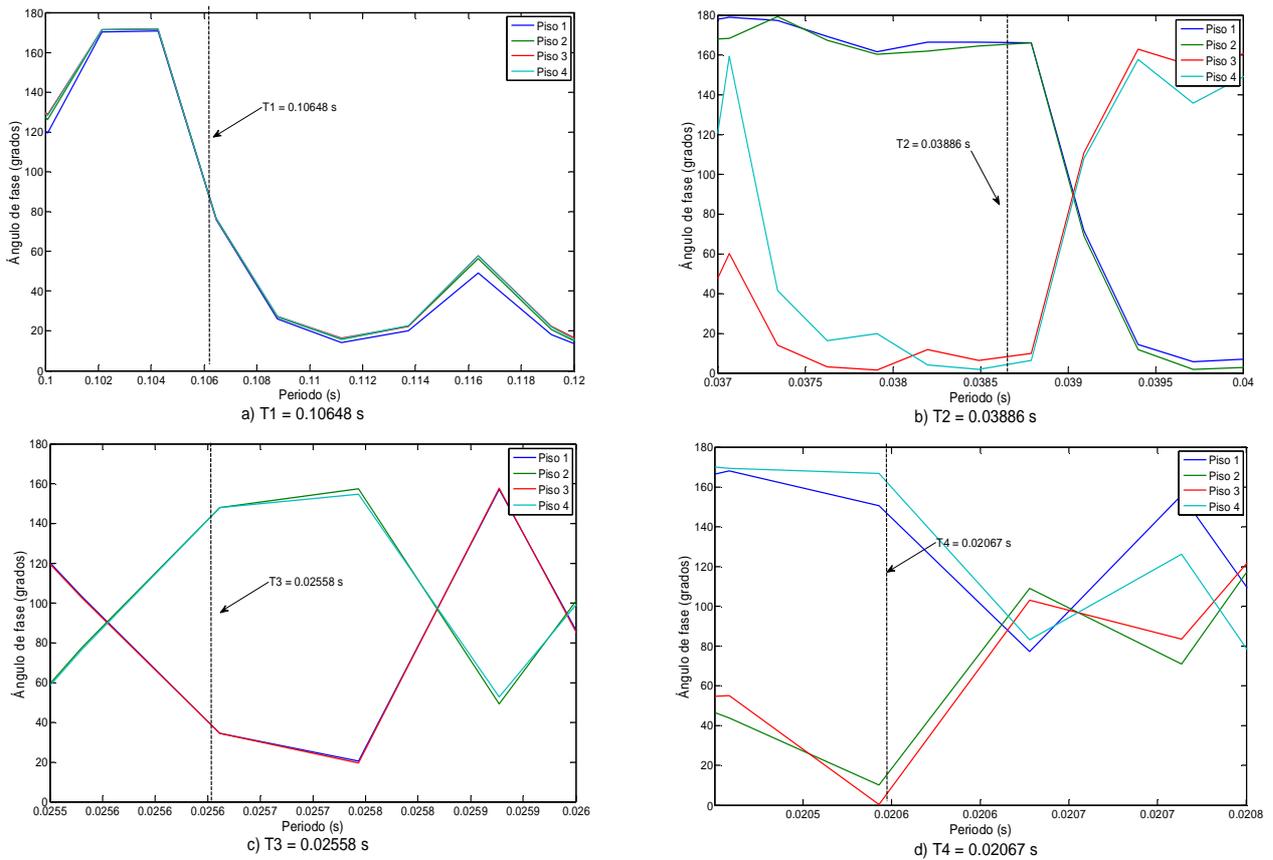


Figura 4.13 Ampliación por periodo de gráfica de ángulo fase

En la figura 4.13 se muestra una ampliación de la figura 4.12 en cada uno de los periodos de vibración identificados para generar los valores del ángulo de fase. En la tabla 4.5 se indican los valores para cada uno de los periodos.

Tabla 4.5 Ángulos de fase de los periodos del marco bidimensional

PISO	ÁNGULO (GRADOS)		
	T1 = 0.1064 s	T2 = 0.0388 s	T3 = 0.0255 s
4	92.060	7.450	168.920
3	92.080	7.160	14.250
2	92.250	172.450	10.670
1	91.730	170.180	160.670

Como se observa en la tabla 4.5 todos los valores del ángulo de fase en cada piso para el primer periodo cuentan con un valor similar entre sí. Lo anterior indica que todos los pisos están en la misma fase, lo cual concuerda con la configuración típica de un primer modo de vibración de una estructura de cuatro pisos.

Para el segundo modo, la polaridad de las formas modales de los pisos 4 y 3 es positiva (valor cercano a 0°) y la de los pisos 1 y 2 es negativa (valor cercano a 180°) esto corrobora que se trata de un segundo modo de vibración.

Para el periodo con valor de 0.0256 s se puede observar que la polaridad de los pisos 1 y 3 es positiva y la de los pisos 2 y 4 es negativa lo cual corresponde a la configuración de un tercer modo de vibración.

Al conocer teóricamente el periodo del cuarto modo en la figura 4.13 en la esquina inferior derecha se muestra el ángulo de fase para un periodo de 0.02067 s. Para determinar si este corresponde a una configuración típica de un cuarto modo, en la tabla 4.6 se indican los valores correspondientes.

Tabla 4.6 Ángulos de fase del cuarto modo modelo bidimensional

PISO	ÁNGULO DE FASE (GRADOS)
4	160.850
3	20.120
2	160.760
1	19.760

Los valores de los pisos 2 y 3 tienen una polaridad positiva y los pisos 1 y 4 negativa, lo cual verifica que se trata de un cuarto modo de vibración.

Para identificar los valores de las formas modales se recurre a las gráficas de la función de transferencia. En la figura 4.14 se muestran las gráficas correspondientes, donde se localizará el valor en el eje vertical para cada uno de los periodos de la estructura.

En estas se tendrán dos valores el primero será el valor correspondiente al eje vertical y el segundo valor será el correspondiente al periodo previamente identificado, en este caso también se considerara el valor del periodo del cuarto modo, para así poder encontrar los valores de todas las formas modales.

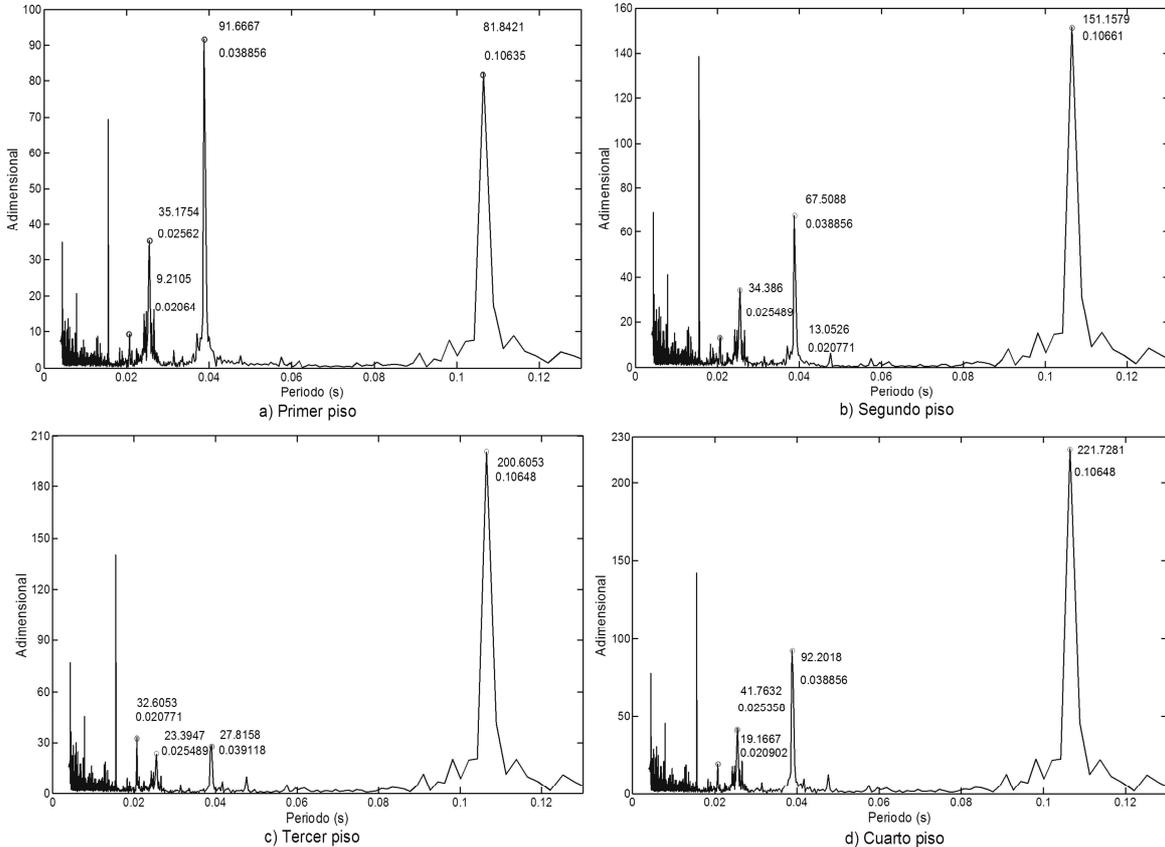


Figura 4.15 Función de transferencia con respecto al terreno marco bidimensional

Tabla 4.7 Valor función de transferencia modelo bidimensional

PISO	PERIODO (s) Y VALOR FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA			
	T1 = 0.1064	T2 = 0.0388	T3 = 0.0255	T4 = 0.0206
4	221.728	92.202	41.763	19.167
3	200.605	27.816	23.395	32.605
2	151.158	67.509	34.386	13.053
1	81.842	91.667	35.176	9.211

En la tabla 4.7 se presenta un resumen de los valores encontrados con la función de transferencia, los cuales proporcionan la configuración de las formas modales de la estructura, esto debido a que la función de transferencia representa el estado de cada uno de los pisos con respecto a una referencia en común, en este caso la base del modelo.

En la tabla 4.8 se presentan los valores de las formas modales normalizadas con respecto del cuarto piso.

Tabla 4.8 Valores de las formas modales marco bidimensional

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.1064	T2 = 0.0388	T3 = 0.0255	T4 = 0.0206
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.905	0.302	-0.560	-1.701
2	0.682	-0.732	-0.823	0.681
1	0.369	-0.994	0.842	-0.481

4.1.2.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia

Para su aplicación es necesario obtener las matrices espectrales de potencia para cada uno de los puntos registrados.

Obteniendo un número n de matrices espectrales $\left[\hat{G}_{yy}(T_n) \right]$ donde n será un valor por cada periodo, cada matriz contará con la siguiente estructura:

$$\left[\hat{G}_{yy}(T_n) \right] = \begin{bmatrix} G_{k,m}(T_n) & \cdots & G_{k,j+1}(T_n) & G_{k,j}(T_n) & G_{k,0}(T_n) \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ G_{i+1,m}(T_n) & & G_{i+1,j+1}(T_n) & G_{i+1,j}(T_n) & G_{i+1,0}(T_n) \\ G_{i,m}(T_n) & & G_{i,j+1}(T_n) & G_{i,j}(T_n) & G_{i,0}(T_n) \\ G_{0,m}(T_n) & \cdots & G_{0,j+1}(T_n) & G_{0,j}(T_n) & G_{0,0}(T_n) \end{bmatrix}$$

Esta matriz será cuadrada de orden $k+1$; donde k es el número de pisos con los que cuenta la estructura. Cada columna contiene los valores espectrales empezando por el piso superior hasta llegar a la columna $k+1$ que tendrá los valores en el terreno. De igual manera, cada renglón corresponde al número de piso de la estructura donde el renglón superior será el k -ésimo piso y el renglón inferior corresponde al terreno.

Aplicando la descomposición por valores singulares a las matrices espectrales de potencia se obtiene la matriz de valores singulares. En estas se encuentra que el primer valor de la diagonal es el único mayor que la unidad, los otros valores tendrán una magnitud prácticamente igual a cero.

Para poder identificar los valores de periodo de la estructura se graficaron las variaciones de valores singulares de la matriz de densidad espectral con respecto a los valores de periodo.

En la figura 4.16 se muestra dicha variación:

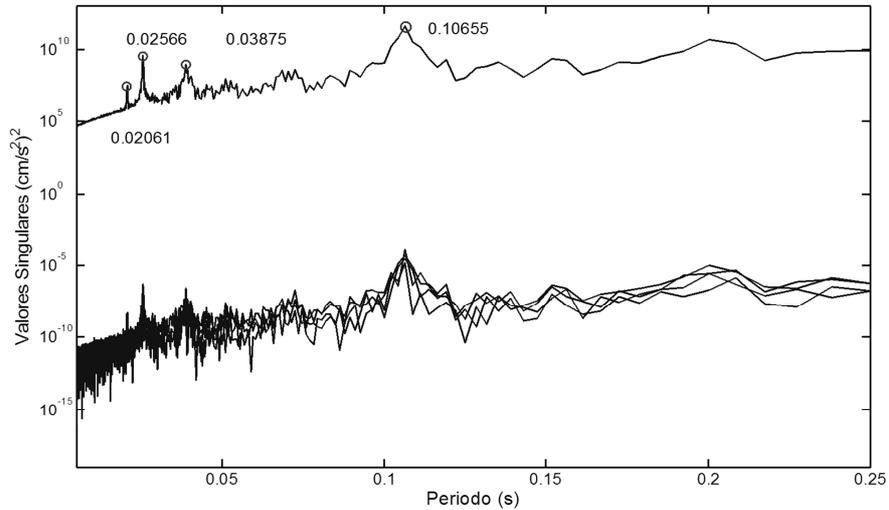


Figura 4.16 Variación de valores singulares del modelo bidimensional

Como se observa en la figura 4.16, destacan cuatro picos, los cuales pueden corresponder a los periodos de vibración del modelo. En la tabla 4.9 se muestran los valores de periodos encontrados en la figura 4.16. Sin embargo, es importante resaltar que también se cuenta con una gran variedad de “picos” que pueden llegar a dificultar la elección correcta de los periodos que corresponden al comportamiento propio de la estructura.

Tabla 4.9 Periodos localizados en la variación de valores singulares modelo bidimensional

MÁXIMOS LOCALIZADOS
PERIODO (s)
0.10655
0.03875
0.02566
0.02061

Para obtener las matrices espectrales de potencia de cada uno de los modos a continuación se debe de localizar el punto n que le corresponde a cada uno de los picos localizados.

Debido a la naturaleza matemática del método de obtención de valores singulares, para obtener los valores correspondientes a cada uno de los picos fue necesario trabajar con frecuencias en vez de periodos.

En la figura 4.17 se muestra la variación de los valores singulares de la matriz espectral de potencia con respecto a los valores de la frecuencia, en la tabla 4.10 se muestran los valores obtenidos en frecuencias y su correspondiente en periodo.

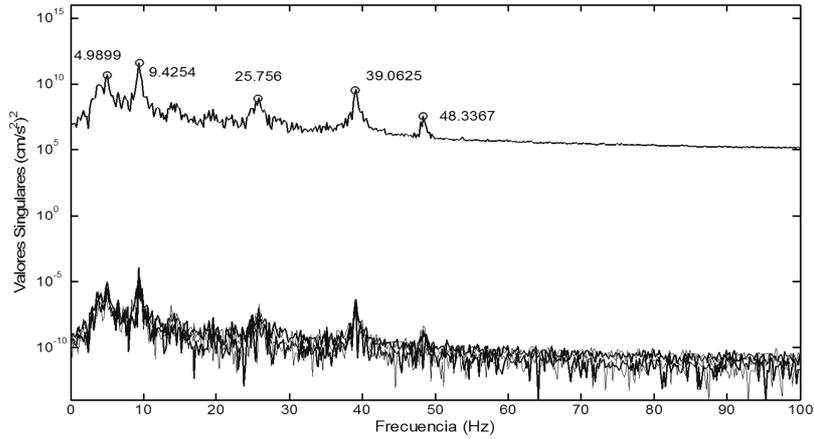


Figura 4.17 Variación de valores singulares con respecto a la frecuencia modelo bidimensional

Tabla 4.10 Frecuencias y periodos identificados, modelo bidimensional

FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
48.3367	0.0206
39.0625	0.0257
25.7650	0.0388
9.4254	0.1066
4.9899	0.2000

Como se aprecia en la tabla 4.10 se encontró un valor de frecuencia correspondiente al periodo de la excitación. Dentro de la figura 4.17 también se encontró una gran cantidad de “picos” que no corresponden a las frecuencias de la estructura ni de la excitación. En este caso resultó útil conocer los periodos obtenidos en la figura 4.16 para así localizar de manera más eficiente las frecuencias necesarias.

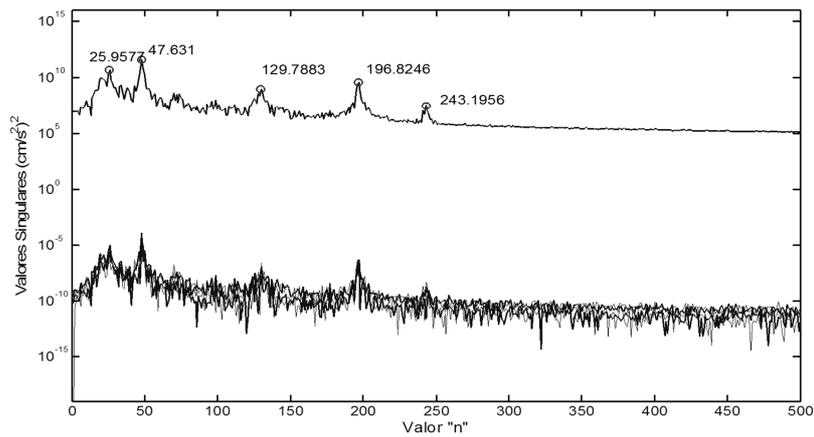


Figura 4.18 Variación de valores singulares con respecto a la frecuencia, obtención de valor n

En la figura 4.18 se identificaron los valores n para cada valor de frecuencia localizado, cuyo valor se presenta en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Valores n para la obtención de las matrices espectrales de potencia

PERIODO (s)	NÚMERO DE PUNTO
0.10659	49
0.03875	130
0.02577	197
0.02061	243

Siguiendo la metodología, es necesario identificar las matrices espectrales de potencia para cada uno de los puntos localizados. A continuación se muestra la matriz para el periodo de 0.10655 s, en el apéndice A se presentan las matrices de los periodos restantes:

$$f_{49} \rightarrow T = 0.10655s$$

$$[\hat{G}_{yy}(f_{49})] = \begin{bmatrix} 2.5791 & 2.3116-0.0008i & 1.7118-0.0038i & 0.8700-0.0138i & -0.1124-0.0162i \\ 2.3116-0.0008i & 2.0718 & 1.5342-0.0039i & 0.7797-0.0127i & -0.1008-0.0145i \\ 1.7118+0.0038i & 1.5342+0.0039i & 1.1361 & 0.5774-0.0079i & -0.0746-0.0109i \\ 0.8700+0.0138i & 0.7797+0.0127i & 0.5774+0.0079i & 0.2935 & -0.0378-0.0061i \\ -0.1124+0.0162i & -0.1008+0.0145i & -0.0746+0.0109i & -0.0378+0.0061i & 0.0050 \end{bmatrix} * 10^{10}$$

Aplicando la descomposición por valores singulares a la matriz anterior se obtiene la matriz $[S_p]$:

$$[S_{49}] = \begin{bmatrix} 3.8878 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.9089 \times 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.7917 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.8908 \times 10^{-7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.4592 \times 10^{-9} \end{bmatrix}$$

Como se observa en la matriz anterior, el primer valor tiene una magnitud mucho mayor a la unidad, mientras que los demás valores de la diagonal tienen una magnitud muy cercana a cero, esto confirma que el primer valor es el dominante.

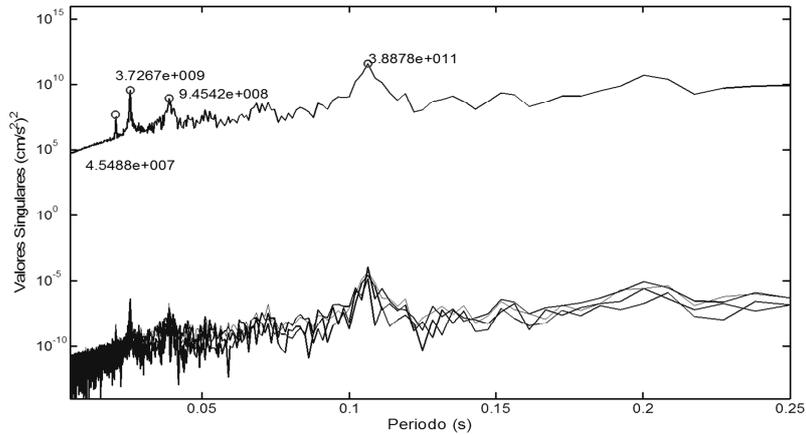


Figura 4.19 Magnitud de valores singulares para cada periodo localizado

En la figura 4.19 se corrobora que este valor corresponde al pico del periodo correspondiente a 0.10655 s. En dicha figura se encuentra la magnitud del valor singular para cada uno de los picos correspondientes a los periodos de la estructura.

Al realizar la descomposición de valores singulares, también se obtiene la matriz $[U_p]$ la cual es la matriz que contiene los vectores singulares:

$$[U_{49}] = \begin{bmatrix} -0.6510 & 0.4619 & 0.4819 & 0.3488 & 0 \\ -0.5835 & 0.1946 & -0.5654 & -0.5373 & 0 \\ -0.4321 & -0.8177 & 0.3248 & -0.1723 & 0 \\ -0.2196 & -0.2760 & -0.5688 & 0.7144 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Para la obtención de las formas modales se utilizaron las matrices $[S_p]$ y $[U_p]$ ya que a cada valor singular dentro de la matriz $[S_p]$ le corresponde un vector singular de la matriz $[U_p]$.

Para la obtención de la primera forma modal se utilizaron las matrices $[S_{49}]$ y $[U_{49}]$ en donde el valor singular de la matriz $[S_{49}](1,1) = 3.8878 * 10^{10}$ es el valor singular dominante por lo que le corresponde el primer vector singular de la matriz $[U_{49}]$. Al normalizar los valores de este vector con respecto al valor del cuarto piso se obtiene la primera forma modal normalizada respecto al mismo.

$$[U_{49}](:,1) = \begin{pmatrix} -0.6510 \\ -0.5835 \\ -0.4321 \\ -0.2196 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.8963 \\ 0.6637 \\ 0.3373 \end{pmatrix}$$

De igual manera, para la obtención de la segunda forma modal se utilizaron las matrices $[S_p]$ y $[U_p]$. En el apéndice A se muestran las matrices $[S_p]$ y $[U_p]$ correspondientes a todos los periodos localizados.

En la tabla 3.14 se presenta un resumen de las formas modales normalizadas con respecto al cuarto piso:

Tabla 4.12 Periodos y formas modales obtenidas por medio de DDF modelo bidimensional

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.1065	T2 = 0.0387	T3 = 0.0256	T4 = 0.0206
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.896	0.291	-0.546	-1.035
2	0.664	-0.726	-0.815	1.069
1	0.337	-0.990	0.828	-0.283

4.1.2.3 Análisis de componentes independientes

Para aplicar el ACI, es necesario conocer los valores de las mezclas y la matriz Q , considerando que los datos de las respuestas dinámicas serán las mezclas que corresponden al vector x . Y conociendo una matriz que garantiza independencia y no-Gaussianidad propuesta por Parra (2007).

En la figura 4.20 se presentan los espectros de Fourier para las fuentes obtenidas por medio de ACI, se puede observar que cada espectro cuenta con un máximo que sobresale de los demás, esto facilita de manera considerable la selección correcta de picos. Este máximo indica el periodo de cada una de las fuentes, en la tabla 4.13 se muestran los periodos localizados en cada una de las fuentes.

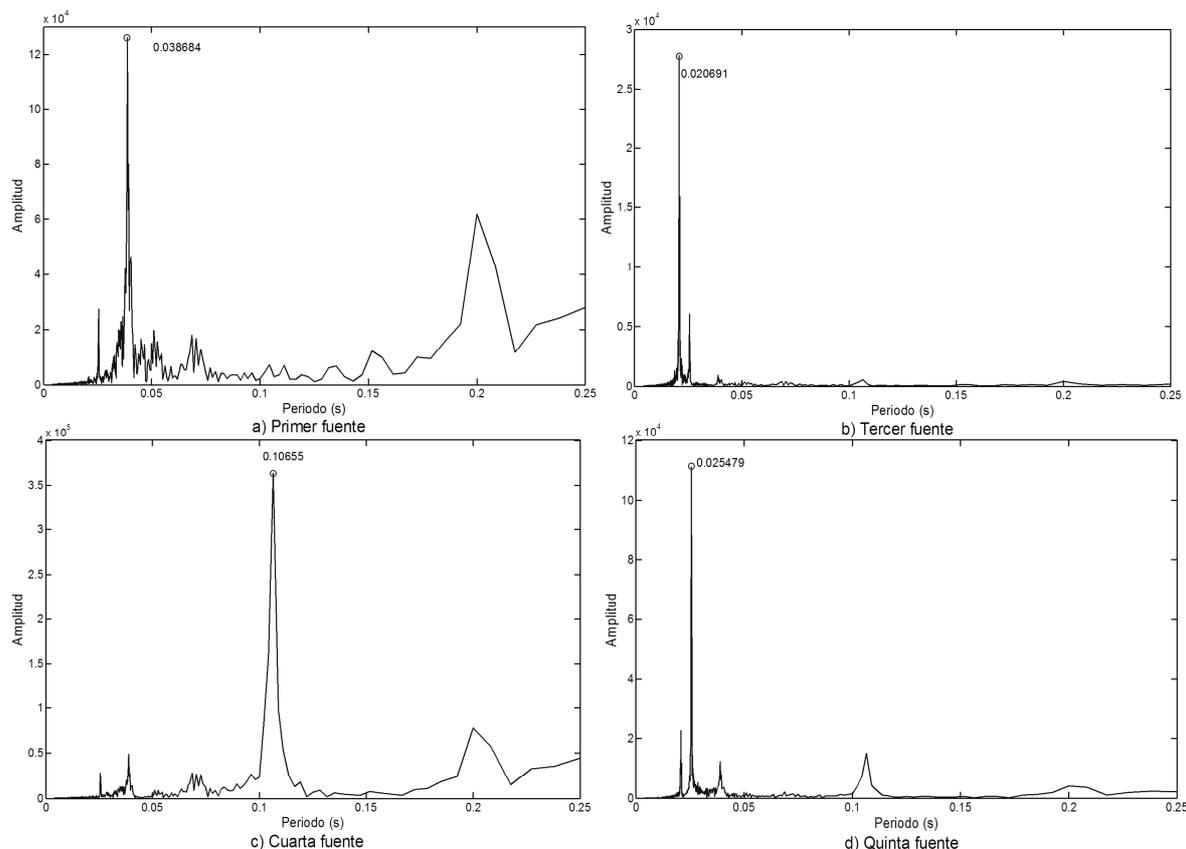


Figura 4.20 Espectros de Fourier de las fuentes obtenidas por el ACI para el modelo bidimensional

Tabla 4.13 Periodos de cada fuente obtenida con ACI para le marco bidimensional

FUENTE	PERIODO (s)
1	0.03864
2	0.20035
3	0.02069
4	0.10655
5	0.02561

En la tabla 4.13 se observa que se cuenta con cinco fuentes, lo que produce como resultado tener cinco periodos. Esto se debe a que uno de los datos de entrada (mezclas) fue la señal de la excitación a la cual fue sometido el marco en su base, por lo que uno de los resultados debe de ser el periodo fundamental de la excitación, en este caso la fuente número dos genera como resultado el periodo de la excitación, motivo por el cual no se presenta el espectro de esta fuente en la figura 4.20.

En la figura 4.21 se presentan en una sola gráfica los espectros de Fourier de todas las fuentes, donde se observa que en cada espectro también se encuentran algunos máximos correspondientes a los otros periodos de la estructura. Sin embargo, destaca el hecho de que cada fuente cuenta con un máximo que

sobresale por mucho de los demás, lo que nuevamente facilita la elección de picos, sin importar la magnitud del periodo.

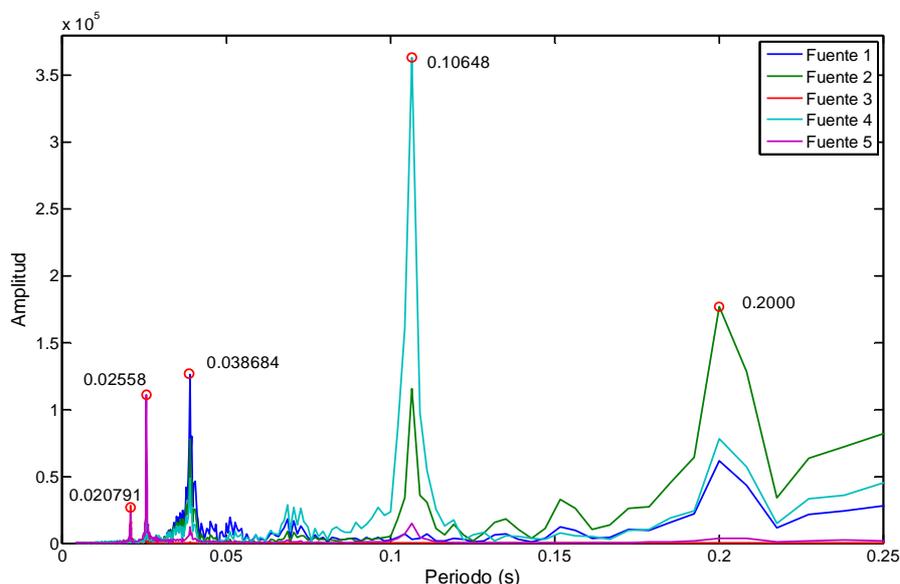


Figura 4.21 Espectro de Fourier de todas las fuentes marco bidimensional

Para la obtención de las formas modales se recurrió a la función de transferencia utilizando los periodos localizados. Así, en la tabla 4.14 se presentan los valores de la función de transferencia correspondientes a cada uno de los valores de periodo obtenidos por medio de ACI.

Tabla 4.14 Valores de la función de transferencia para cada periodo localizado con ACI modelo bidimensional

PISO	PERIODO (s) Y VALOR FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA			
	T1 = 0.1065	T2 = 0.0386	T3 = 0.0256	T4 = 0.0206
4	222.296	92.577	42.604	11.591
3	200.574	26.995	23.248	14.067
2	151.475	67.407	34.741	11.850
1	82.008	91.905	35.267	4.779

En la tabla 4.15 se muestran los valores de las formas modales normalizadas al cuarto piso. La polaridad de las formas modales se obtuvo por medio del ángulo de fase.

Tabla 4.15 Formas modales generadas con base en ACI modelo bidimensional

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.1065	T2 = 0.0386	T3 = 0.0256	T4 = 0.0206
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.902	0.292	-0.546	-1.214
2	0.681	-0.728	-0.815	1.022
1	0.369	-0.993	0.828	-0.412

4.1.3 Análisis y comparación de resultados

4.1.3.1 Periodos

En la tabla 4.16 se presentan los periodos identificados con cada uno de los métodos, en la tabla 4.17 se muestran los valores de error relativo con respecto a los valores teóricos:

Tabla 4.16 Periodos (s) localizados modelo bidimensional

MODO	TEÓRICO	MÉTODO		
		AEC	DDF	ACI
1	0.1065	0.10640	0.10659	0.10655
2	0.0389	0.03868	0.03875	0.03864
3	0.0256	0.02558	0.02577	0.02561
4	0.0207	NI	0.02061	0.02069

NI: No identificado.

Tabla 4.17 Error relativo en la obtención de periodos de vibración (%) modelo bidimensional

MODO	METODO		
	AEC	DDF	ACI
1	0.09	-0.08	-0.05
2	0.57	0.39	-0.10
3	0.08	-0.66	-0.04
4	NI	0.43	0.05

NI: No identificado.

Como se aprecia en las tablas anteriores, con el AEC no se logra identificar visualmente de las gráficas el periodo correspondiente al cuarto modo, lo que ocasiona que se tenga información modal incompleta.

Para los otros modos y en este caso, considerando los tres métodos empleados, se puede decir que todos los métodos proporcionaron resultados muy cercanos a los valores teóricos, ya que en ningún caso se superó el 1% de error relativo.

Sin embargo, por las características propias de cada uno de los métodos el ACI sobresale, al brindar elementos (espectros de Fourier de las fuentes) en los cuales resulta evidente la identificación de periodos de vibración. Esto gracias al hecho de que presenta espectros cuya característica principal, es que cada uno cuenta con un máximo cuya amplitud es significativamente de mayor magnitud que la de los demás, y dicho máximo corresponde a uno de los periodos de vibración del modelo. Al contrario de las gráficas generadas por el AEC y por el DDF, en las cuales se tienen varios máximos lo que en ocasiones dificulta la interpretación de las mismas.

4.1.3.2 Formas modales

En la tabla 4.18 se presentan el valor del DMN, se utiliza el criterio DMN ya que este indica de manera más representativa la diferencia entre los modos teóricos y los obtenidos, en el apéndice A se encuentran las tablas con los valores del CCM, CCMC y DMN generados por todos los métodos:

Tabla 4.18 DMN de las formas modales para el modelo bidimensional

MODO	DMN (%)		
	AEC	DDF	ACI
1	0.00	2.00	0.00
2	2.65	2.65	2.83
3	2.24	1.73	1.73
4	NI	12.21	2.83

NI: No identificado.

De acuerdo con la tabla 4.18 los tres métodos presentan resultados muy aproximados a los valores teóricos con respecto a la identificación de formas modales para los tres primeros modos. Sin embargo, con el AEC no se fue capaz de obtener los valores correspondientes al cuarto modo. En el caso del DDF presentó valores de error mayores al 10%. En la figura 4.22 se presentan las configuraciones de las formas modales con respecto a las teóricas.

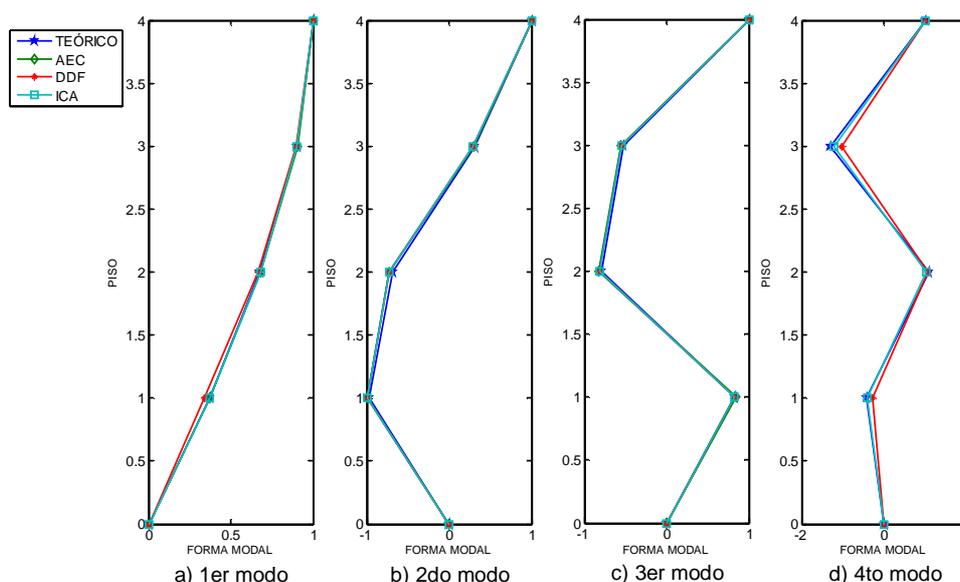


Figura 4.22 Configuración de formas modales generadas para el marco bidimensional

4.1.3.3 Conclusiones

Después de analizar los resultados generados por los métodos utilizados, se puede concluir que los tres presentan resultados con valores muy aproximados a los teóricos para la obtención de periodos ya que no se presentó un error mayor al 1%. Sin embargo, en este modelo, con el AEC no se identificó el valor del periodo correspondiente al cuarto modo de vibración.

Para la obtención de las formas modales los tres métodos produjeron resultados muy cercanos a los teóricos para los tres primeros modos. Para el cuarto modo el AEC no proporcionó información en la cual se pudiera identificar visualmente el periodo, lo que provocó que no se obtuvieran valores de la forma modal y el DDF generó un DMN mayor al 10% lo que crea cierta incertidumbre al momento de considerar este valor.

En ambos casos (obtención de periodos y formas modales) el ACI, proporcionó los resultados con menor error y más cercanos a los valores teóricos.

4.2 MODELO TRIDIMENSIONAL

Se propuso un marco tridimensional con el fin de identificar sus propiedades dinámicas en sus dos direcciones ortogonales, así como de torsión. Se utilizó el programa de análisis estructural ETABS para obtener las propiedades dinámicas y los registros para evaluar los métodos de obtención de propiedades dinámicas.

4.2.1 Introducción

4.2.1.1 Propiedades geométricas

En la figura 4.23 se indican las características geométricas del modelo. El módulo de elasticidad del material se definió de $E = 2.531 \times 10^9 \frac{kg}{cm^2}$. Se consideraron columnas de 50 x 50 cm y vigas de 20 x 40 cm. Se aplicaron cargas repartidas sobre los sistemas de entrepiso de $W = 1.00 \frac{ton}{m^2}$. Los apoyos del modelo son empotrados. Y se considera un diafragma rígido en los entrepisos.

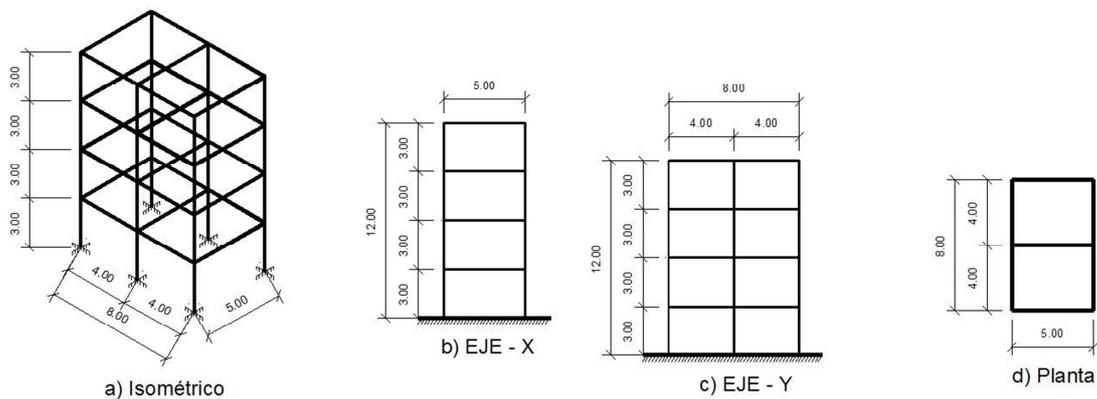


Figura 4.23 Configuración geométrica del modelo tridimensional

4.2.1.2 Obtención de registros

Se utilizó el mismo registro que se aplicó el modelo bidimensional. Con el propósito de generar registros en las dos direcciones ortogonales horizontales y provocar comportamiento de torsión, el registro se aplicó con un ángulo de incidencia distinto de 90° .

4.2.1.3 Propiedades dinámicas del modelo tridimensional

En las tablas 4.19 y 4.20 se presentan los periodos y formas modales teóricos.

Tabla 4.19 Periodos teóricos del modelo tridimensional

DIRECCIÓN X		DIRECCIÓN Y		TORSIÓN	
MODO	PERIODO (S)	MODO	PERIODO (S)	MODO	PERIODO (S)
1	0.5377	2	0.4604	3	0.4274
4	0.1453	5	0.1311	6	0.1224
7	0.0663	8	0.0635	9	0.0630
10	0.0411	11	0.0407	12	0.0370

Las formas modales se presentan normalizadas respecto al cuarto piso. Las correspondientes al comportamiento de torsión corresponden a rotaciones en contraparte de las generadas para los ejes ortogonales las cuales representan desplazamientos.

Tabla 4.20 Formas modales teóricas normalizadas al cuarto piso modelo tridimensional

DIRECCIÓN X			DIRECCIÓN Y			TORSIÓN		
MODO	PISO	FORMA MODAL	MODO	PISO	FORMA MODAL	MODO	PISO	FORMA MODAL
1	4	1.0000	2	4	1.0000	3	4	1.0000
	3	0.7739		3	0.7965		3	0.7933
	2	0.4696		2	0.5044		2	0.5000
	1	0.1652		1	0.1858		1	0.1800
4	4	1.0000	5	4	1.0000	6	4	1.0000
	3	-0.4270		3	-0.3516		3	-0.3734
	2	-1.1910		2	-1.1538		2	-1.1494
	1	-0.7079		1	-0.7143		1	-0.7054
7	4	1.0000	8	4	1.0000	9	4	1.0000
	3	-1.9245		3	-1.8364		3	-1.8881
	2	0.3585		2	0.2364		2	0.2937
	1	1.9811		1	1.9091		1	1.9371
10	4	1.0000	11	4	1.0000	12	4	1.0000
	3	-3.1364		3	-3.0870		3	-3.1356
	2	4.5455		2	4.3913		2	4.5085
	1	-4.3636		1	-4.0870		1	-4.2712

Los datos obtenidos en las tablas 4.19 y 4.20 se utilizaron como parámetro para comparar los resultados obtenidos al aplicar los tres métodos al modelo. La configuración de las formas modales teóricas se presenta en el apéndice A.

4.2.2 Aplicación de métodos

4.2.2.1 Análisis espectral convencional

Los espectros de Fourier de los registros obtenidos en el centro de rigidez del modelo en la dirección X se muestran en la figura 4.24, en la tabla 4.21 se indican los periodos asociados a los máximos localizados.

Como se aprecia en la figura 4.24 se identificaron cuatro máximos en todos los espectros de Fourier. En algunas de las gráficas se destacan también los máximos correspondientes a los periodos de la excitación, los cuales se descartan al momento de asociarlos a los periodos propios del sistema.

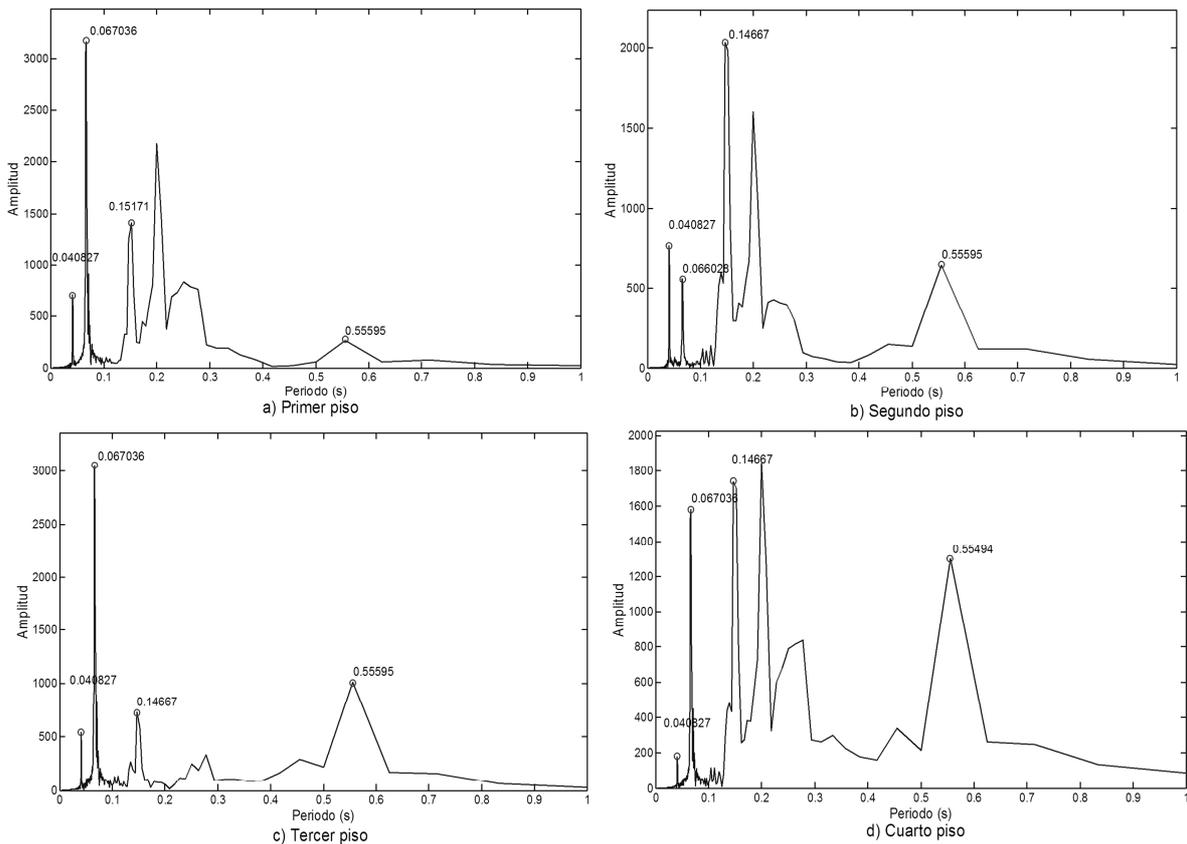


Figura 4.24 Espectros de Fourier de los registros generados en el centro de rigidez, dirección X

Tabla 4.21 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier dirección X

PISO			
1	2	3	4
0.0408	0.0408	0.0408	0.040827
0.0670	0.0660	0.0670	0.067036
0.1517	0.1467	0.1467	0.14667
0.5560	0.5560	0.5560	0.55494

En la figura 4.25 se presenta el autoespectro de potencia del registro obtenido en el primer piso, se puede observar que solo se destacan cuatro máximos y dos de ellos corresponden a periodos propios de la excitación, lo cual confirma que los autoespectros de potencia no deben de ser los únicos elementos a utilizar para la identificación de periodos de vibración de un sistema.

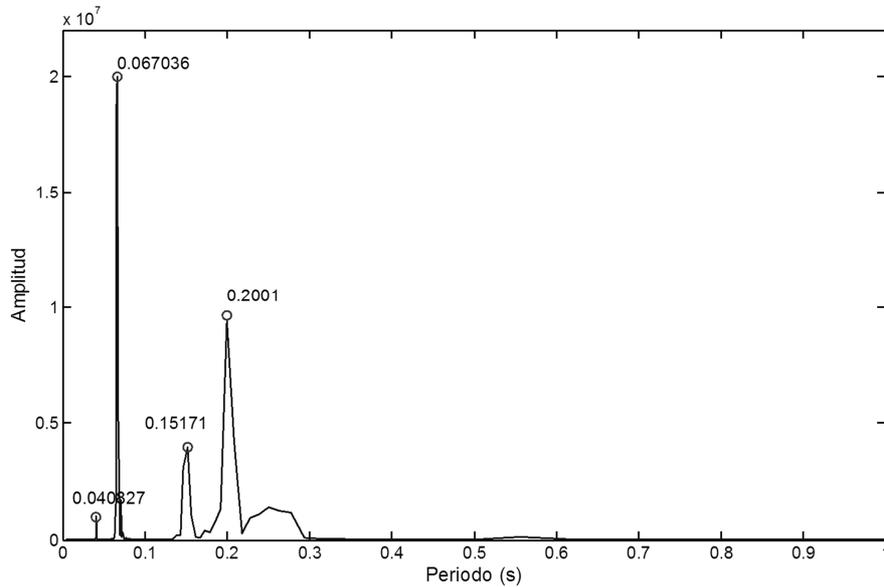


Figura 4.25 Autoespectro de potencia primer piso dirección X

En la tabla 4.22 se indican los periodos identificados en los autoespectros de potencia de los registros generados en todos los pisos, las gráficas correspondientes se presentan en el apéndice A.

Después revisar los espectros de Fourier y los autoespectros de potencia se definieron cuatro periodos distintos a los correspondientes a la excitación inducida a la estructura. En la tabla 4.23 se muestran los valores correspondientes.

Se calcularon los ángulos de fase con los espectros cruzados de cada uno de los niveles con respecto al terreno. En la tabla 4.24 se muestran los valores para cada uno de los periodos señalados en la tabla 4.23.

Tabla 4.22 Periodos (s) localizados en los autoespectro de potencia dirección X

NIVEL			
1	2	3	4
0.0408	0.0408	0.0408	0.06704
0.0670	0.0660	0.0670	0.14667
0.1517	0.1467	0.1467	0.55595
0.2001	0.5560	0.5560	

Tabla 4.23 Periodos de vibración localizados en la dirección X del modelo tridimensional (AEC)

MÁXIMOS LOCALIZADOS
PERIODO (s)
0.5560
0.1467
0.0670
0.0408

Tabla 4.24 Ángulos de fase dirección X modelo tridimensional

PISO	ÁNGULO (GRADOS)			
	T1 = 0.5377 s	T2 = 0.1453 s	T3 = 0.0663 s	T4 = 0.0411 s
4	55.140	170.560	40.090	43.230
3	51.040	15.460	138.890	140.620
2	50.280	11.120	42.780	42.110
1	43.150	10.560	40.090	139.750

Como se observa en la tabla 4.24 todos los valores del ángulo para el periodo de 0.5377 s cuentan con un valor similar en este caso menor a los 90°, lo que indica que todos los niveles están en la misma fase lo cual concuerda con la configuración típica de un primer modo de vibración de una estructura de cuatro pisos.

Para el segundo periodo, la polaridad del ángulo del cuatro piso es negativa (valor cercano a 180°) y la de los pisos 1, 2 y 3 es positiva (valor cercano a 0°), lo cual concuerda con la configuración de un segundo modo.

La polaridad de los pisos 1,2 y 4 es positiva y la del piso 3 es negativa esto para el tercer periodo, para el último periodo se puede observar que los valores de los pisos 2 y 4 tienen una polaridad positiva y los pisos 1 y 3 cuentan con una polaridad negativa. Dichas combinaciones corresponden a la tipa configuración modal de un tercer y cuarto modo respectivamente.

Para identificar los valores de las formas modales se recurre a las gráficas de la función de transferencia, en la tabla 4.25 se resumen los datos correspondientes a los periodos propios de la

estructura, las gráficas de la función de transferencia, así como la gráfica del ángulo de fase se encuentran en el apéndice A.

Tabla 4.25 Valores de la función de transferencia dirección X modelo tridimensional (AEC)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.5560	T2 = 0.1467	T3 = 0.0670	T4 = 0.0408
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.772	-0.408	-1.926	-3.087
2	0.494	-1.164	0.366	4.295
1	0.202	-0.715	1.991	-3.983

Para la dirección Y se realizó la misma metodología, en la figura 4.26 se muestran los espectros de Fourier de la respuesta dinámica de cada uno de los pisos, cuyos valores se presentan en la tabla 4.26.

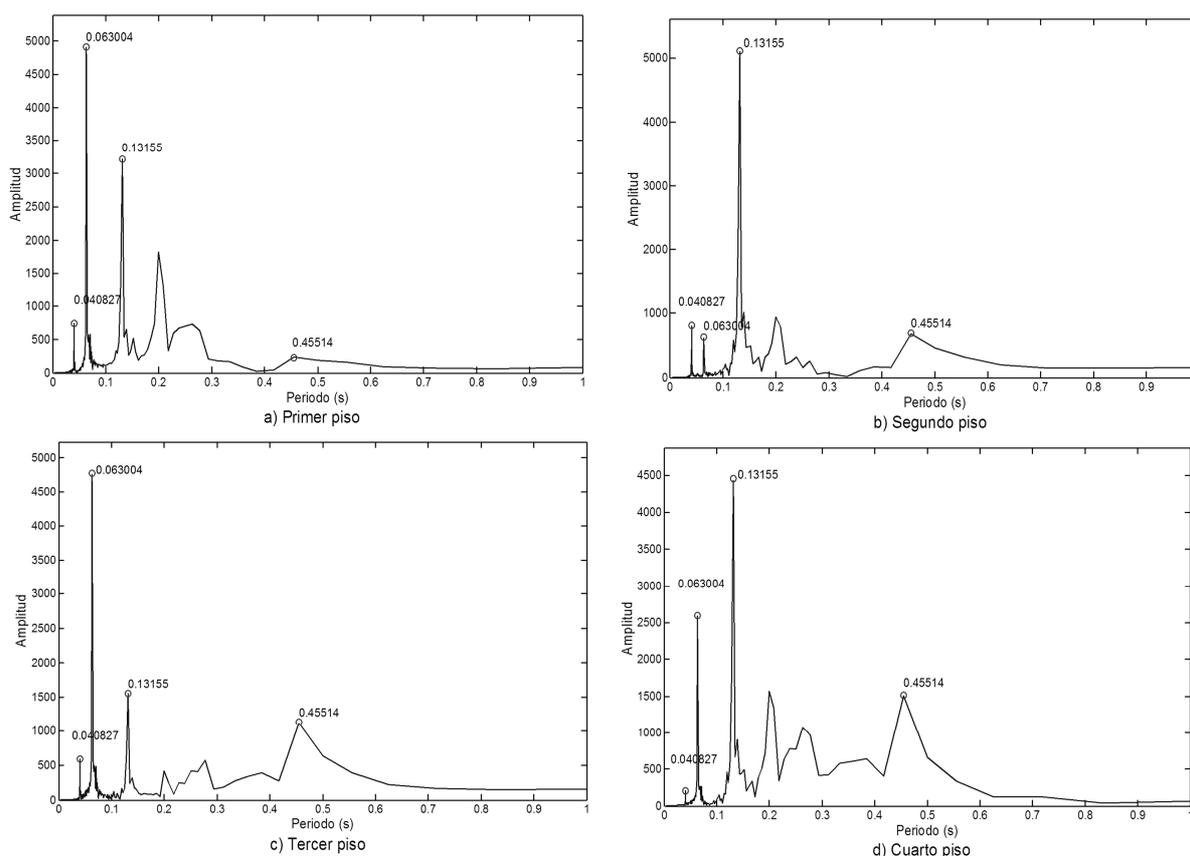


Figura 4.26 Espectros de Fourier de los registros generados en el centro de rigidez, dirección Y

Tabla 4.26 Periodos (s) localizados en los espectro de Fourier en dirección Y

PISO			
1	2	3	4
0.04083	0.04083	0.04083	0.04083
0.06304	0.06300	0.06300	0.06300
0.13155	0.13155	0.13155	0.13155
0.45514	0.45514	0.45514	0.45514

Como se aprecia en la figura 4.26 en cada uno de los espectros se pueden localizar cuatro picos de amplificación distintos a los correspondientes a los periodos de la excitación.

La figura 4.27 corresponde el autoespectro de potencia del registro del segundo nivel, se observa que nuevamente algunos máximos quedaron eliminados. En la tabla 4.27 se presenta el valor de los periodos de vibración definidos para la dirección Y.

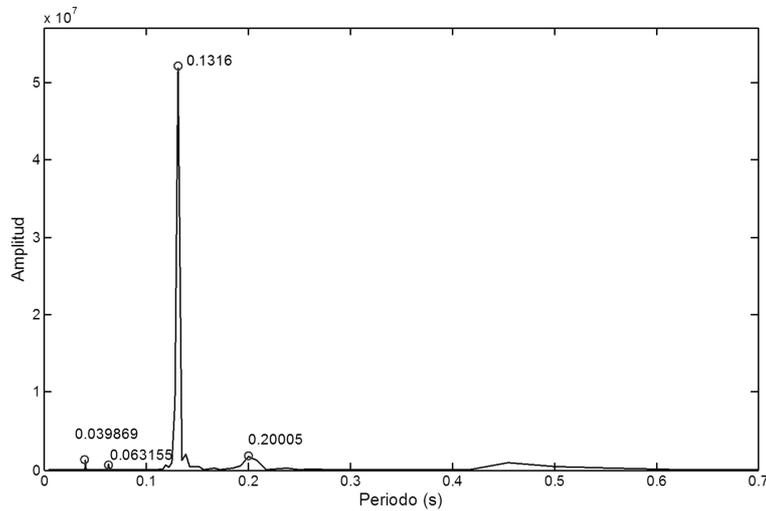


Figura 4.27 Autoespectro de potencia del registro del segundo piso dirección Y

Tabla 4.27 Periodos de vibración de la estructura dirección Y modelo tridimensional (AEC)

MÁXIMOS LOCALIZADOS
PERIODO (s)
0.4551
0.1316
0.0630
0.0408

Con base en las gráficas de ángulo de fase y función de transferencia se generó la configuración de las formas modales, las gráficas se encuentran en el apéndice A.

La tabla 4.28 contiene los valores de las formas modales normalizadas al cuarto piso para la dirección Y.

Tabla 4.28 Formas modales dirección Y modelo en tres dimensiones (AEC)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.4551	T2 = 0.1316	T3 = 0.0630	T4 = 0.0408
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.741	-0.299	-1.824	-1.890
2	0.443	-1.211	0.239	2.521
1	0.155	-0.836	1.887	-2.301

Para la obtención de las propiedades dinámicas de torsión se utilizaron los registros obtenidos en el centro de rigidez y en un extremo del modelo, con base en la diferencia entre las aceleraciones de cada uno de los puntos y la distancia entre los mismos, se calcula el ángulo que proporcionara el giro.

En la figura 4.28 se muestran los espectros de Fourier de los datos obtenidos para la obtención del giro. En la tabla 4.29 se presenta un resumen de los datos de valores de periodos localizados en la figura 4.28.

Tabla 4.29 Periodos (s) de torsión localizados en espectros de Fourier

PISO			
1	2	3	4
0.03705	0.03705	0.03705	0.03705
0.04058	0.04128	0.04058	0.04128
0.06245	0.06316	0.06316	0.06316
0.12172	0.12172	0.12172	0.12172
0.13090	0.13090	0.13160	0.13090
0.41739	0.41668	0.41688	0.41668

En todos los espectros se puede observar que existen seis máximos. Sin embargo, en este caso también hay que descartar los periodos correspondientes a la excitación inducida en el modelo (los correspondientes a 0.04128 s y 0.13090 s), los cuales se obtuvieron al realizar el espectro de Fourier del giro que se genera en la base del modelo, al descartar estos periodos quedan definidos los posibles periodos de torsión de la tabla 4.30.

Tabla 4.30 Periodos de torsión localizados en espectros de Fourier modelo tridimensional (AEC)

MÁXIMOS LOCALIZADOS
PERIODO (s)
0.4167
0.1217
0.0632
0.0370

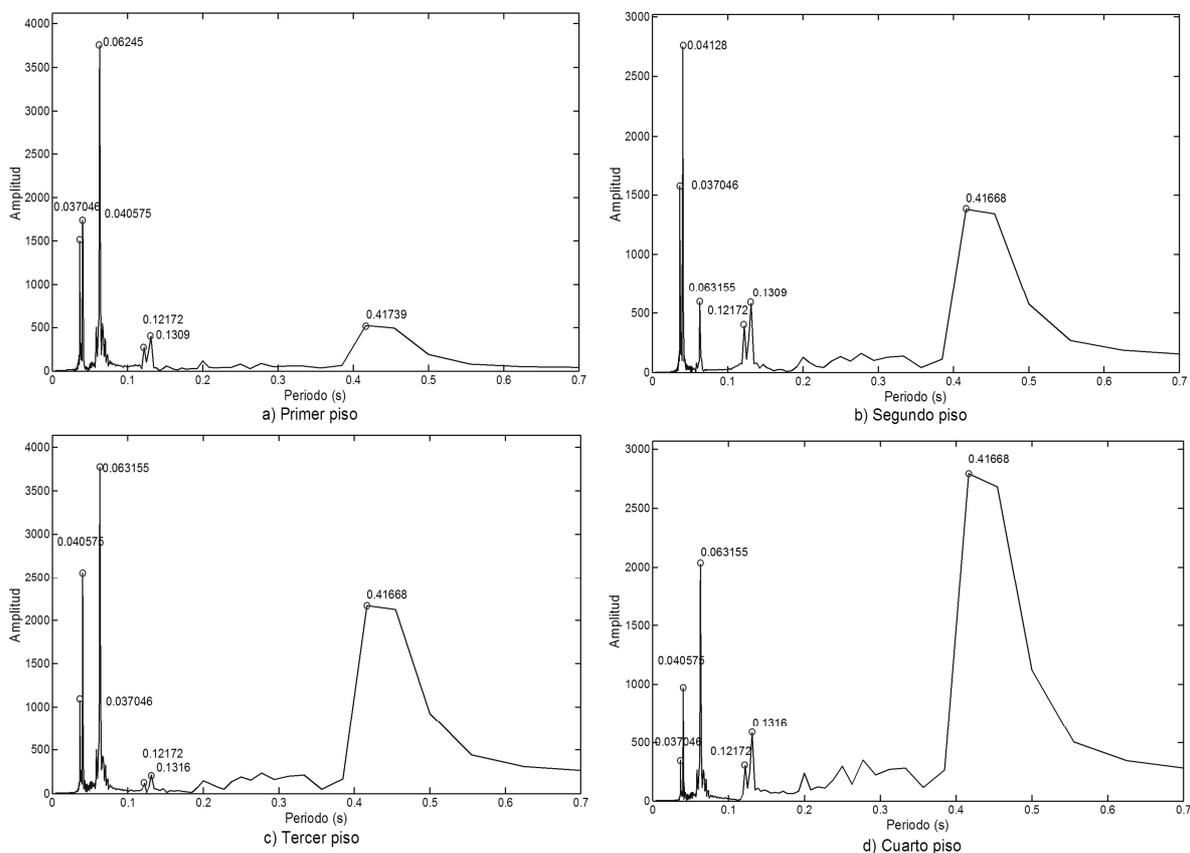


Figura 4.28 Espectros de Fourier para obtención de periodos de torsión modelo tridimensional

Utilizando los valores del ángulo de fase y de la función de transferencia se generaron las formas modales, que fueron normalizadas con respecto al cuarto piso (Apéndice A). En la tabla 4.31 se presentan los valores de las formas modales normalizadas, es importante recordar que dichos valores representan ángulos y no desplazamientos.

Tabla 4.31 Formas modales de torsión modelo tridimensional (AEC)

NIVEL	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.4167	T2 = 0.1217	T3 = 0.0632	T4 = 0.0370
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.776	-0.207	-1.905	-3.151
2	0.491	-1.039	0.383	4.614
1	0.189	-0.802	1.691	-4.426

4.2.2.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia

Para realizar la identificación de máximos de amplificación, se graficó la variación de valores singulares de la matriz de densidad espectral con respecto a los valores de periodo. En la figura 4.29 se presentan las gráficas para las dos direcciones horizontales ortogonales y de torsión, en escala logarítmica y en escala decimal, esto con la intención de contar con más elementos para localizar los periodos. Los registros para los periodos de torsión, se obtuvieron al generar el ángulo que se producía entre la diferencia de registros obtenidos en el centro de torsión y del extremo con base en la distancia de su localización.

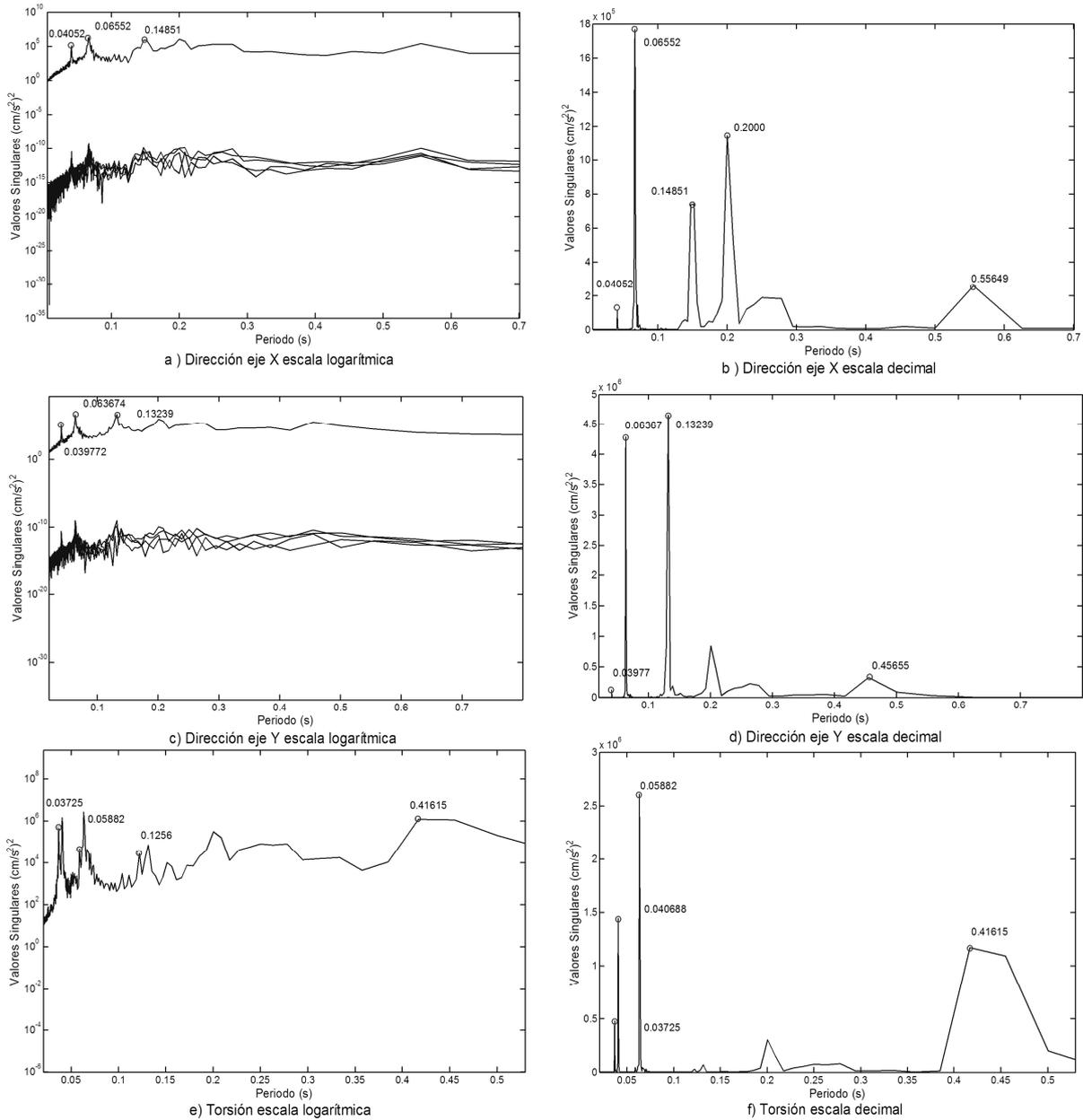


Figura 4.29 Variación de valores singulares del modelo tridimensional

La tabla 4.32 contiene un resumen de los máximos de amplificación localizados en cada una de las gráficas anteriores.

Tabla 4.32 Periodos (s) localizados modelo tridimensional (DDF)

DIRECCIÓN X	DIRECCIÓN Y	TORSIÓN
0.5565	0.4566	0.4161
0.1485	0.1324	0.1220
0.0655	0.0637	0.0588
0.0405	0.0398	0.0373

Al conocer las matrices espectrales de potencia para cada uno de los periodos localizados se realizó la descomposición de valores singulares para obtener las formas modales, en las tablas 4.33 a 4.35 se presentan los valores normalizados al cuarto piso.

Tabla 4.33 Formas modales dirección X modelo tridimensional (DDF)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.5565	T2 = 0.1485	T3 = 0.0655	T4 = 0.0405
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.776	-0.348	-1.931	-3.054
2	0.494	-1.163	0.338	4.264
1	0.140	-0.830	2.002	-3.953

Tabla 4.34 Formas modales dirección Y modelo tridimensional (DDF)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	0.4566 (1)	0.1324 (2)	0.0637 (3)	0.0398 (4)
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.744	-0.350	-1.837	-3.433
2	0.446	-1.151	0.234	5.156
1	0.155	-0.725	1.895	-5.056

Tabla 4.35 Formas modales de torsión modelo tridimensional (DDF)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.4161	T2 = 0.1220	T3 = 0.0588	T4 = 0.0373
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.792	-0.367	-1.890	-3.099
2	0.500	-1.309	0.294	4.524
1	0.182	-0.904	1.872	-4.327

4.2.2.3 Análisis de componentes independientes

En la figura 4.30 se presentan los espectros de Fourier de las fuentes generadas a partir de los registros obtenidos en el centroide en la dirección X. Se puede observar que cada uno cuenta con un máximo de amplificación que sobresale de los demás, así como el hecho de que en cada uno también presenta información de los otros periodos de vibración de la estructura.

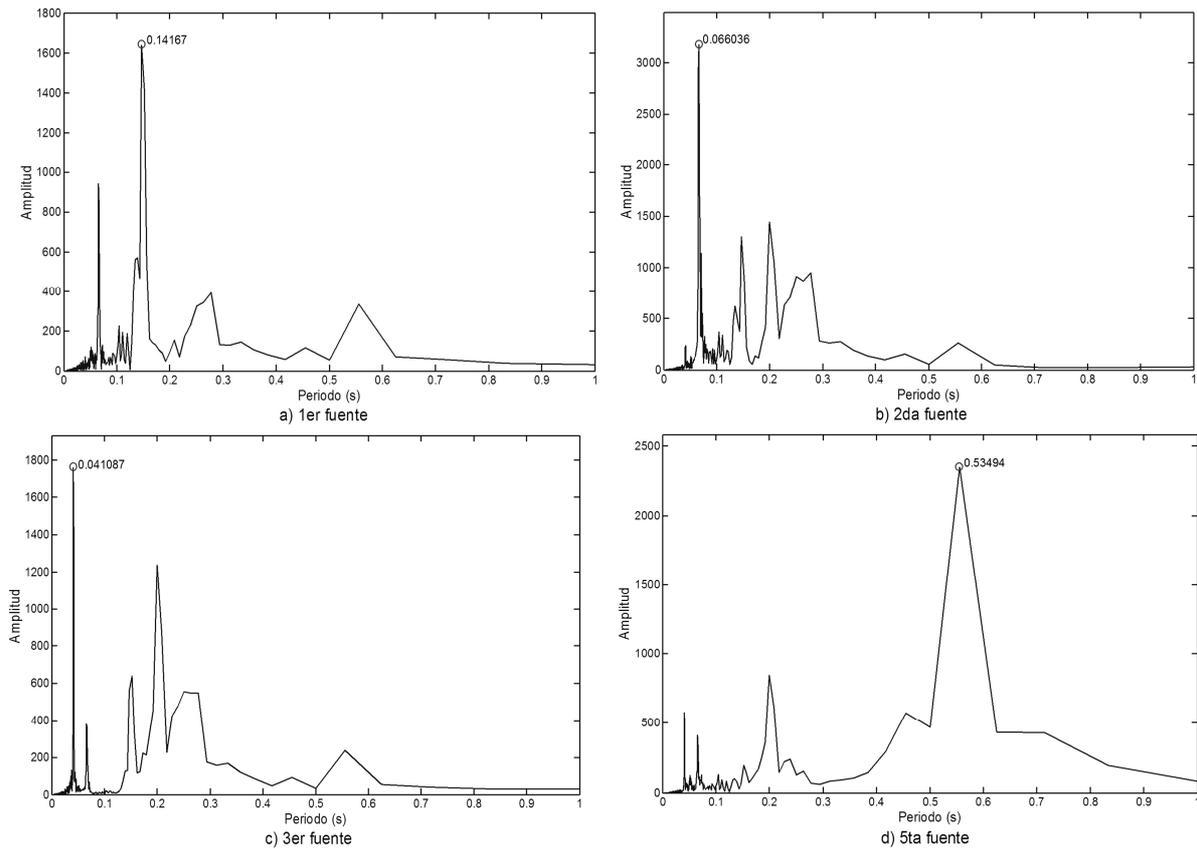


Figura 4.30 Espectros de Fourier de fuentes generadas en la dirección X

En la figura 4.30 no se presenta el espectro de la cuarta fuente debido a que este muestra el pico correspondiente al periodo de la excitación.

En la figura 4.31 se graficaron con todos los espectros de las fuentes generadas por el ACI, con el propósito de observar que en cada una de las fuentes cuenta con información de todo el sistema.

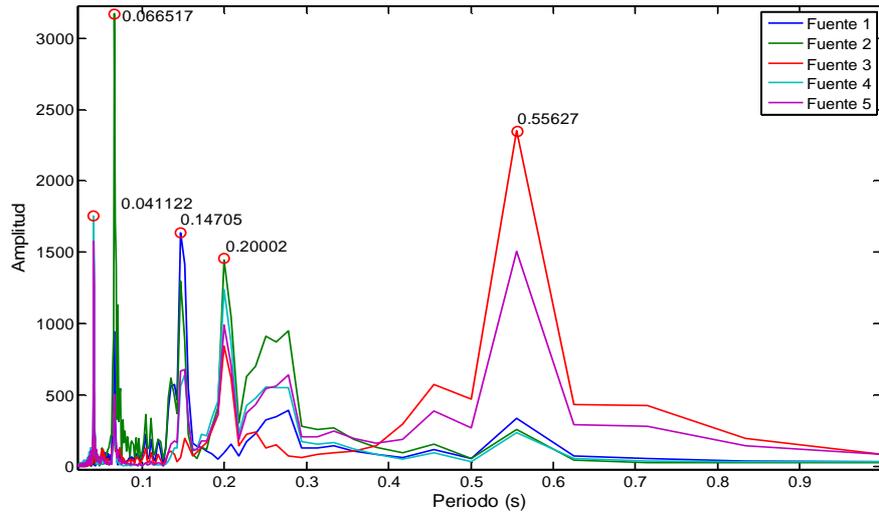


Figura 4.31 Espectro de Fourier de todas las fuentes. Centroidal dirección X

En la figura 4.32 se muestran los espectros de Fourier de las fuentes generadas para la dirección Y, y para obtener los periodos de torsión se presentan los espectros en la figura 4.33. En las tablas 4.36, 4.37 y 4.38 se resumen los valores de las formas modales.

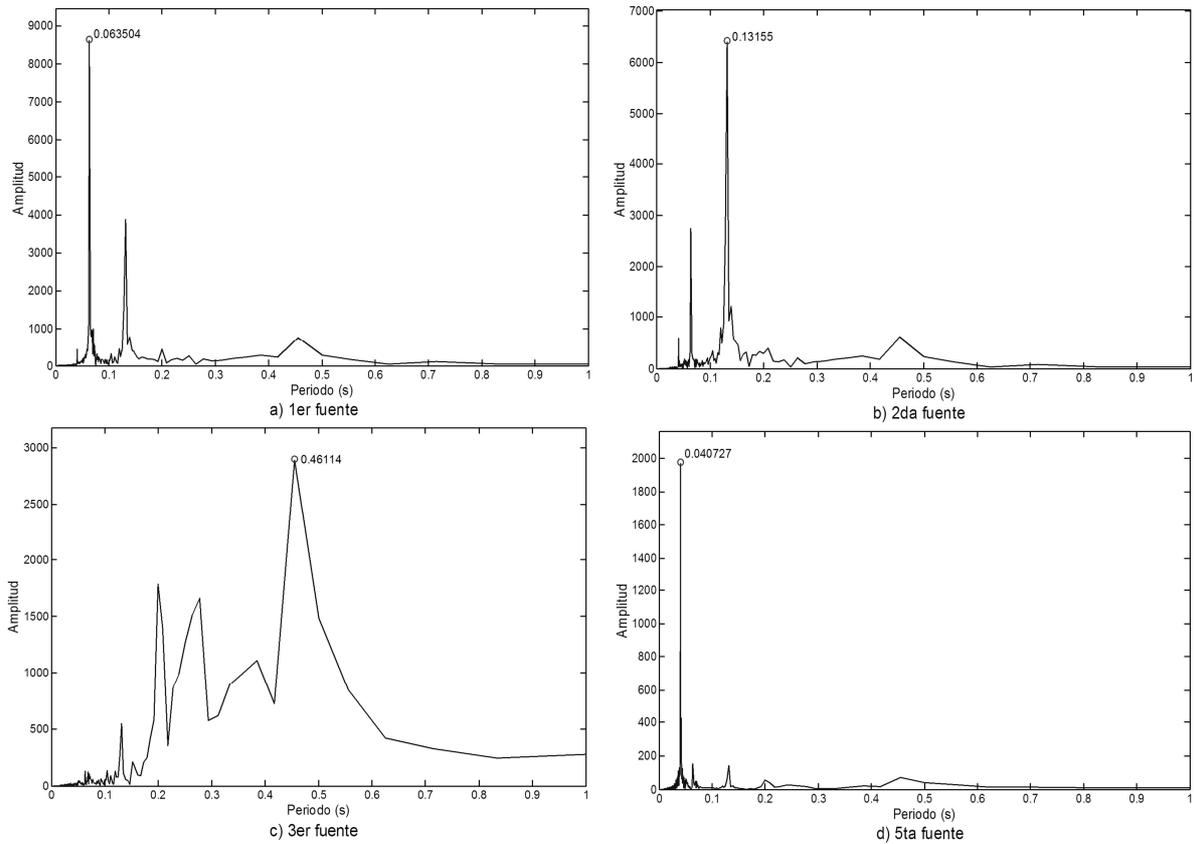


Figura 4.32 Espectros de Fourier de fuentes generadas por ACI dirección Y

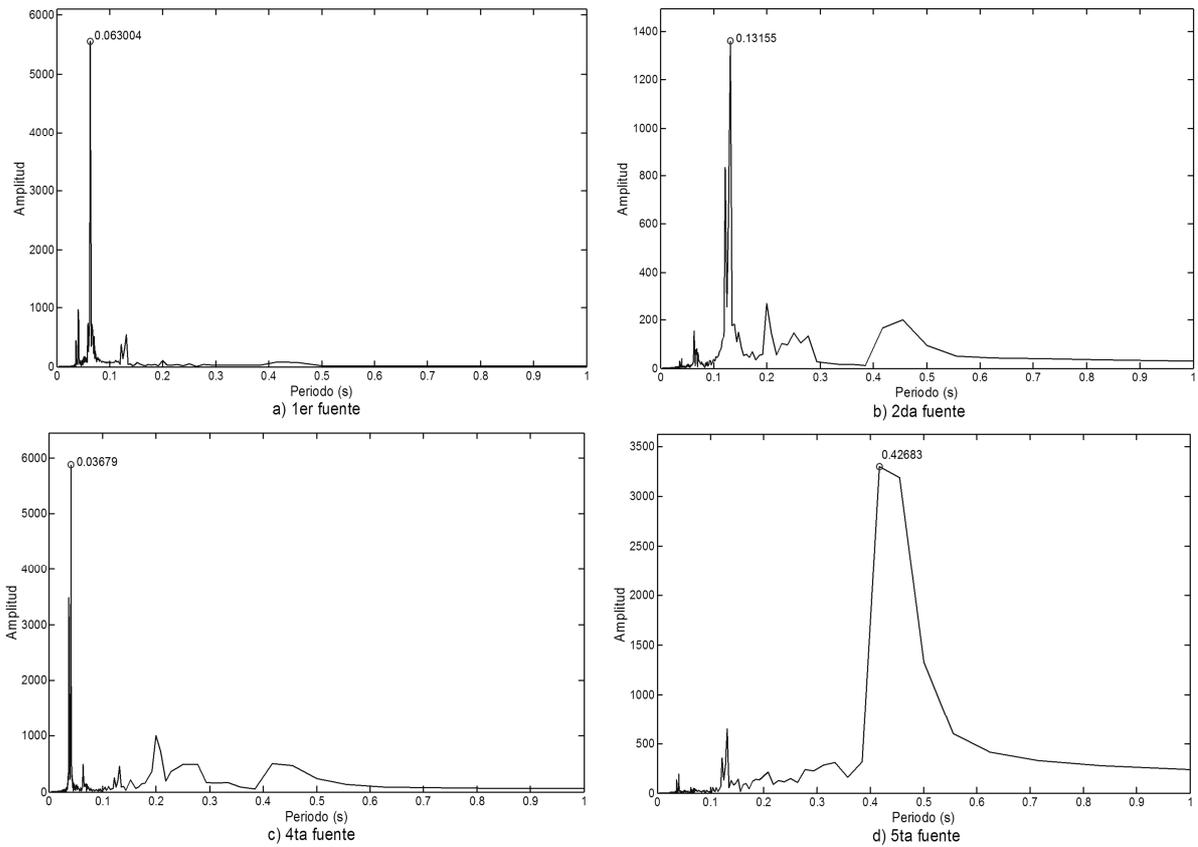


Figura 4.33 Espectros de Fourier de fuentes generadas por ACI para torsión

Tabla 4.36 Formas modales dirección X modelo tridimensional (ACI)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.5349	T2 = 0.1457	T3 = 0.0660	T4 = 0.0411
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.766	-0.411	-1.938	-3.148
2	0.479	-1.198	0.340	4.439
1	0.186	-0.719	1.858	-4.322

Tabla 4.37 Formas modales dirección Y modelo tridimensional (ACI)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.4611	T2 = 0.1316	T3 = 0.0635	T4 = 0.0407
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.781	-0.336	-1.824	-3.109
2	0.512	-1.199	0.239	4.389
1	0.177	-0.738	1.887	-4.251

Tabla 4.38 Formas modales de torsión modelo tridimensional (ACI)

PISO	PERIODO (s) y MODO			
	T1 = 0.4268	T2 = 0.1225	T3 = 0.0630	T4 = 0.0368
4	1.000	1.000	1.000	1.000
3	0.772	-0.408	-1.970	-3.148
2	0.474	-1.197	0.338	4.593
1	0.162	-0.785	2.022	-4.397

En el caso de la dirección Y la cuarta fuente contiene la información correspondiente al periodo de la excitación.

En los espectros generados para identificar los periodos de torsión, la información de la excitación se presentó en la tercera fuente.

4.2.3 Análisis y comparación de resultados

4.2.3.1 Periodos

En las tablas 4.39 a 4.41 se presentan los periodos encontrados con cada uno de los métodos, en dirección X, dirección Y así como torsión respetivamente, en la tabla 4.42 se muestran los valores de error relativo con respecto a los valores teóricos:

Tabla 4.39 Periodos (s) localizados dirección X modelo tridimensional

DIRECCIÓN X				
MODO	TEÓRICO	MÉTODO		
		AEC	DDF	ACI
1	0.5377	0.5560	0.5565	0.5349
4	0.1453	0.1467	0.1485	0.1457
7	0.0663	0.0670	0.0655	0.0660
10	0.0411	0.0408	0.0405	0.0411

Tabla 4.40 Periodos (s) localizados dirección Y modelo tridimensional

DIRECCIÓN Y				
MODO	TEÓRICO	MÉTODO		
		AEC	DDF	ACI
2	0.4604	0.4551	0.4566	0.4611
5	0.1311	0.1316	0.1324	0.1316
8	0.0635	0.0630	0.0637	0.0635
11	0.0407	0.0408	0.0398	0.0407

Tabla 4.41 Periodos (s) localizados de torsión modelo tridimensional

TORSIÓN				
MODO	TEÓRICO	MÉTODO		
		AEC	DDF	ACI
3	0.4274	0.4167	0.4161	0.4268
6	0.1224	0.1217	0.1220	0.1225
9	0.0630	0.0632	0.0588	0.0630
12	0.0370	0.0370	0.0373	0.0368

Tabla 4.42 Errores relativos de periodos modelo tridimensional

ERROR RELATIVO (%)											
MODO	DIRECCIÓN X			MODO	DIRECCIÓN Y			MODO	TORSIÓN		
	AEC	DDF	ACI		AEC	DDF	ACI		AEC	DDF	ACI
1	-3.39	-3.49	0.51	2	1.14	0.84	-0.16	3	2.51	2.64	0.13
4	-0.94	-2.21	-0.25	5	-0.34	-0.98	-0.34	6	0.56	0.36	-0.07
7	-1.11	1.18	0.40	8	0.78	-0.27	-0.01	9	-0.25	6.66	-0.01
10	0.66	1.41	0.03	11	-0.31	2.28	-0.07	12	-0.12	-0.70	0.56

En los valores de la tabla 4.42, se observa que los tres métodos proporcionaron gráficas en las cuales se pudieron identificar todos los periodos correspondientes a las dos direcciones ortogonales así como los periodos de torsión, brindando valores muy aproximados a los teóricos, en ningún caso se rebasa un valor de error de 10%, de hecho, la mayor parte de los datos proporcionados no genera un error mayor al 5%, salvo el obtenido por medio del DDF en el tercer periodo de torsión.

Los valores identificados por medio de las fuentes generadas por medio del ACI no presentan errores mayores al 1%.

4.2.3.2 Formas modales

En las figuras 4.34 y 4.35 se presentan las configuraciones de las formas modales en las dos direcciones horizontales ortogonales normalizadas al cuarto piso. En la tabla 4.43 se presenta el valor de la DMN.

Tabla 4.43 Diferencia modal normalizada para el modelo tridimensional

DMN (%)											
MODO	DIRECCIÓN X			MODO	DIRECCIÓN Y			MODO	TORSIÓN		
	AEC	DDF	ACI		AEC	DDF	ACI		AEC	DDF	ACI
1	3.16	2.45	0.00	2	5.01	4.70	1.41	3	1.41	0.00	2.24
4	1.41	8.34	0.00	5	6.80	0.00	2.24	6	12.75	9.09	3.88
7	0.00	1.00	0.00	8	0.00	0.00	0.00	9	7.96	1.73	1.73
10	2.83	2.83	0.00	11	10.88	4.48	1.73	12	2.83	1.00	1.00

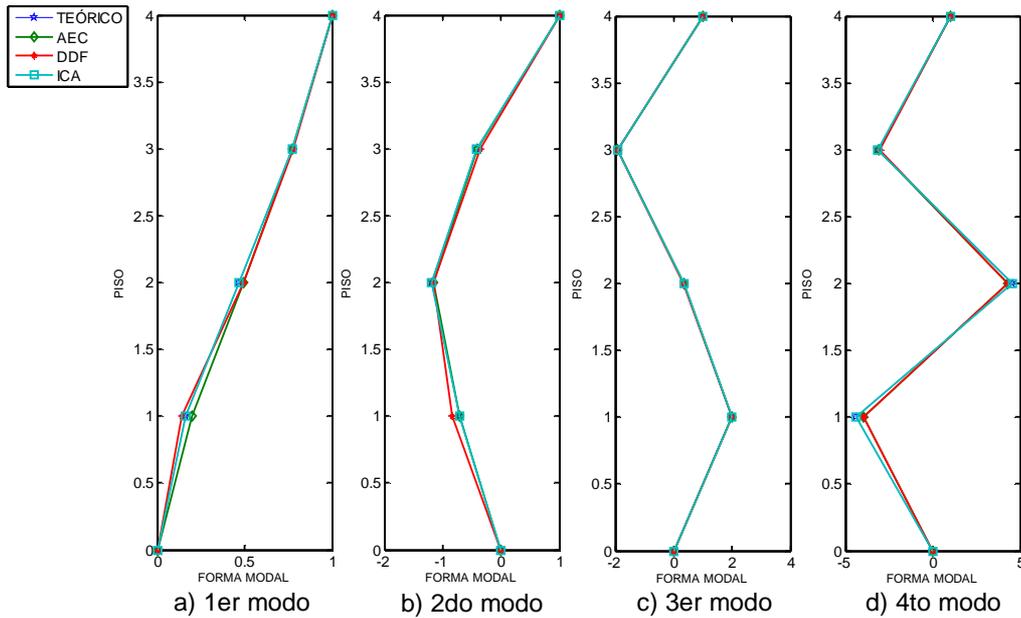


Figura 4.34 Configuración de formas modales dirección X modelo tridimensional

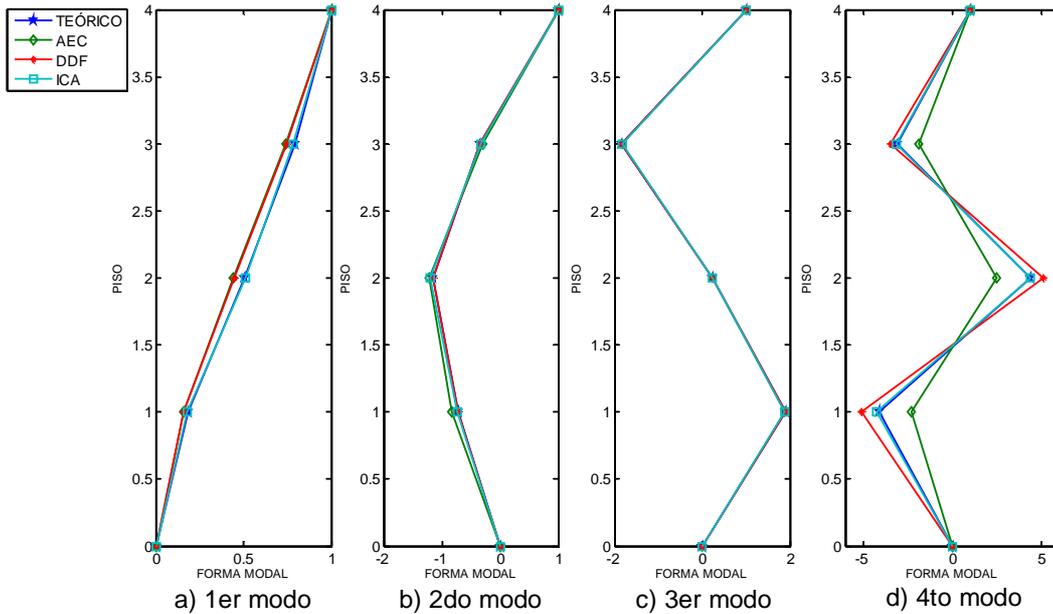


Figura 4.35 Configuración de formas modales dirección Y modelo tridimensional

En el apéndice A se presentan las tablas que contienen los valores de los criterios de comparación de formas modales restante.

Al observar los datos de la diferencia modal normalizada se destaca el hecho de que al utilizar los métodos propuestos los resultados obtenidos son en gran manera aproximados a los valores teóricos, sin embargo resaltan algunos modos en específico que superan el 10% de error, los cuales fueron definidos por los métodos de AEC y por el de DDF.

Al revisar los valores de error al obtener las formas modales con los periodos identificados por ACI se observa que estos no presentan errores mayores al 4% de hecho la mayoría de los mismo se encuentra por debajo de un 2% de error.

4.2.3.3 Conclusiones

Después de estudiar los resultados obtenidos al aplicar los tres métodos, en un modelo tridimensional, se puede concluir que al generar resultados utilizando el ACI se obtuvieron resultados más aproximados a los teóricos. Sin embargo es importante mencionar que en esta ocasión utilizando las herramientas de los distintos métodos se fue capaz de identificar todos los periodos sin importar su magnitud tanto en las direcciones ortogonales del modelo así como los periodos de torsión dentro de un nivel de error aceptable es decir por debajo del 10%. De igual manera al momento de obtener las formas modales los errores se mantuvieron dentro de un intervalo admisible en la mayoría de los casos, sin embargo al utilizar los métodos de AEC y DDF se obtuvieron en algunos modos errores mayores o muy cercanos al 10% al contrario de los resultados generados con ACI los cuales se mantuvieron por debajo del 5% de error.

4.3 EDIFICIO DE CONCRETO

El objetivo de aplicar los métodos de análisis de señales, AEC, DDF e ICA a modelos teóricos, es establecer la precisión con la cual se pueden llegar a identificar las propiedades dinámicas de las estructuras.

Para al utilizar cada una de las herramientas generadas por los métodos en el caso de estructuras y mediciones reales poder identificar periodos y formas modales conociendo el porcentaje de error que se puede llegar a obtener.

En el 2010 se realizó una campaña de medición de vibraciones de ruido ambiental, la cual incluyo un edificio de concreto de siete pisos ubicado en la ciudad de México del cual se obtuvieron registros para determinar sus propiedades dinámicas con base en las vibraciones provocadas por eventos como son movimiento de elevadores, paso de personas, tránsito vehicular, etc.

4.3.1 Introducción

4.3.1.1 Descripción del edificio

Edificio de vivienda de siete pisos y dos sótanos, ubicado en la ciudad de México en la zona IIIa. Pisos tipo de 26 m x 14.5 m, correspondiente a un área de 377 m². La estructuración es a base de marcos y muros de concreto reforzado en el cubo de elevadores desde el sótano hasta el piso de azotea, y tres muros de concreto reforzado en la colindancia de la estructura que van desde la planta baja hasta la azotea. Las losas de los estacionamientos y planta baja son aligeradas, las de los demás pisos son de vigueta y bovedilla.

La cimentación así como las dimensiones y distribuciones de las plantas no son conocidas debido a que no se proporcionó la información y no se permitió realizar un levantamiento.

4.3.1.2 Características del equipo de medición

Se utilizó un equipo de alta sensibilidad marca Kinometrics. A continuación se muestran las características de los equipos utilizados.

Acelerógrafo Makalu marca Kinometrics:

Número de Canales: 3.
Intervalo Dinámico: >114 dB.
Resolución: 24 bits.

Sensores acelerométricos EpiSensor marca Kinometrics:

Tipo: FBA ES-T Triaxial
Escala: + 2.0 g.
Salida: + 10V a 10,000 ohms.
Ruido: de 0 a 50 Hz, menos de + 2.5 μ V
Ancho de banda: -3dB @1g de 208Hz
Ganancia en 100Hz: -0.26dB
Sensibilidad: 0.06g/Voltio

4.3.1.3 Puntos de medición

Se realizaron mediciones en los dos sótanos y en los siete pisos, incluida la azotea. En cada piso se realizaron registros en dos ubicaciones: una aproximadamente en el centro de rigidez y la otra en un extremo de la estructura. En la figura 4.36 se muestra un croquis de ubicación de los puntos en los cuales se realizaron los registros.

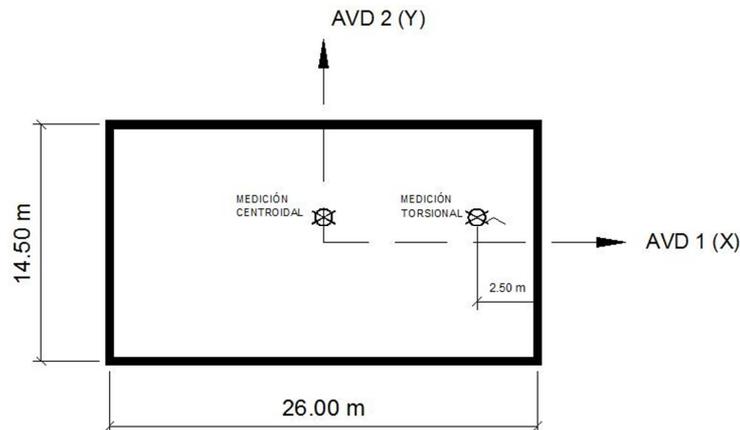


Figura 4.36 Croquis de ubicación de puntos de medición

Debido a que esta estructura es de vivienda el acceso a los puntos de medición en ocasiones no fue permitido. En la tabla 4.44 se muestra una relación de los pisos y los puntos de medición que se obtuvieron, es importante mencionar que por la naturaleza del equipo utilizado en los puntos que se

llegó a realizar un registro se obtuvieron datos en las dos direcciones ortogonales horizontales así como en el eje vertical.

Tabla 4.44 Relación de pisos y puntos de medición

Piso	Centro	Torsión
Azotea	Si	Si
6	Si	Si
5	Si	No
4	Si	Si
3	Si	Si
2	Si	Si
1	Si	Si
PB	Si	No
S1	Si	No
S2	No	No

4.3.1.4 Metodología de medición

Para la determinación de los periodos dominantes del terreno se utilizó un sensor colocado en los sótanos, para obtener registros de las dos direcciones horizontales ortogonales así como en la dirección vertical, a fin de efectuar la determinación mediante la técnica de Nakamura (1989).

En todos los casos, se tomaron 10 lecturas de un minuto de duración cada una, con una densidad de registro de 200 muestras por segundo (muestreo a cada 0.005 s).

El número total de registros de vibración ambiental tomados en el edificio fue de 45 en 15 ubicaciones distintas. Cada señal de 10 minutos registrada fue dividida en ventanas con duraciones de un minuto. Con los registros obtenidos en cada medición, se calcularon las historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos, así como los espectros de Fourier, para cada dirección.

A las señales obtenidas se les aplicaron los tres métodos con el fin de obtener las propiedades dinámicas de la estructura.

4.3.1.5 Preprocesamiento de señales

Con el fin de eliminar los periodos provocados por ruido ambiental, se aplicó un filtro tipo Butterworth paso bandas para periodos de 0.008 s y de 5 s.

Para estudiar las propiedades del inmueble, se aplicó la FCIM (Función compleja indicadora de modos), considerándose para cada evento el siguiente ejemplo: en la dirección del eje X en el piso 4 se obtuvieron 10 registros de un minuto cada uno. Dejando como resultado un registro para cada piso, en cada una de las direcciones ortogonales horizontales para los datos obtenidos en el punto central y un registro para los pisos en los que fue posible obtener información en el punto torsional.

4.3.1.6 Obtención del periodo fundamental de vibración del suelo

De acuerdo a Nakamura (1989) la función de transferencia, para la obtención del periodo fundamental del suelo queda descrita como:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (4.1)$$

donde S_{HS} es la ordenada espectral en el dominio de la frecuencia obtenida del registro en dirección horizontal y S_{VS} es la correspondiente al registro en dirección vertical, ambos generados en la base de la estructura.

En la figura 4.37 se muestran las historias de aceleraciones obtenidas al aplicar la FCIM a los registros obtenidos en el sótano.

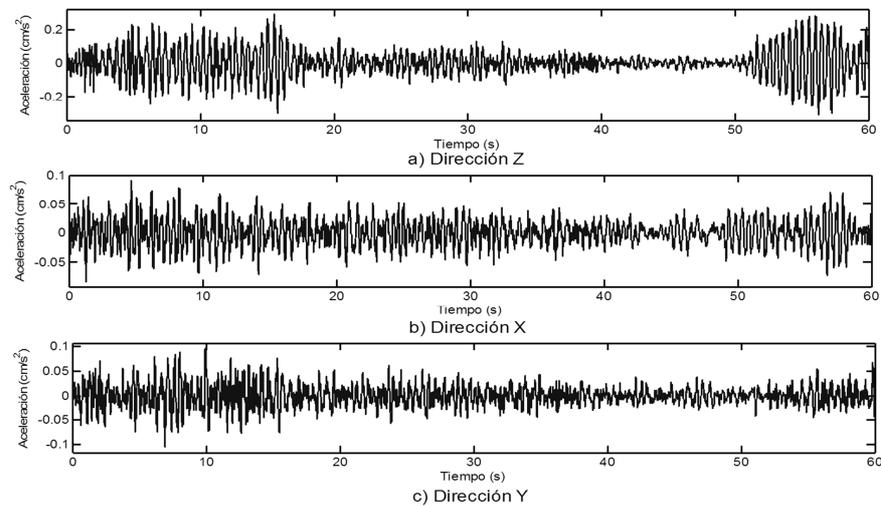


Figura 4.37 Registro de aceleraciones en terreno

Al aplicar la ec. (4.1) las ordenadas espectrales en el dominio de la frecuencia correspondientes a la función de transferencia se muestran en la figura 4.38, en la tabla 4.45 se indican los periodos localizados.

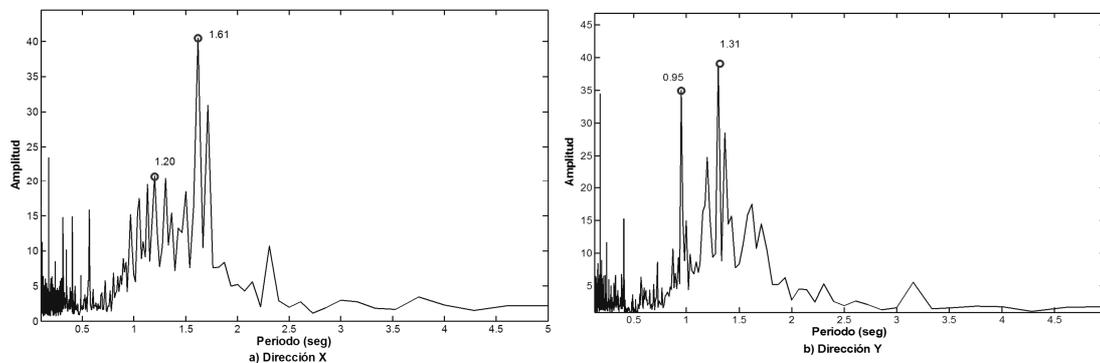


Figura 4.38 Función de transferencia para obtención de periodo del suelo direcciones X y Y

Tabla 4.45 Periodos del suelo obtenidos mediante la técnica de Nakamura

PERIODOS (s)	
DIRECCIÓN X	DIRECCIÓN Y
1.20	0.95
1.61	1.31

El periodo con mayor magnitud será el considerado como el periodo dominante, en este caso tendrá un valor de 1.61 s.

En la figura 4.39 se presenta el mapa de periodos dominantes del suelo de la ciudad de México, de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2004). La ubicación del edificio se señala con un punto negro. Se puede observar que está entre las curvas de 2.0s y 1.5s, por lo que el periodo obtenido por medio de la técnica de Nakamura de 1.61 s, resulta ser consistente.

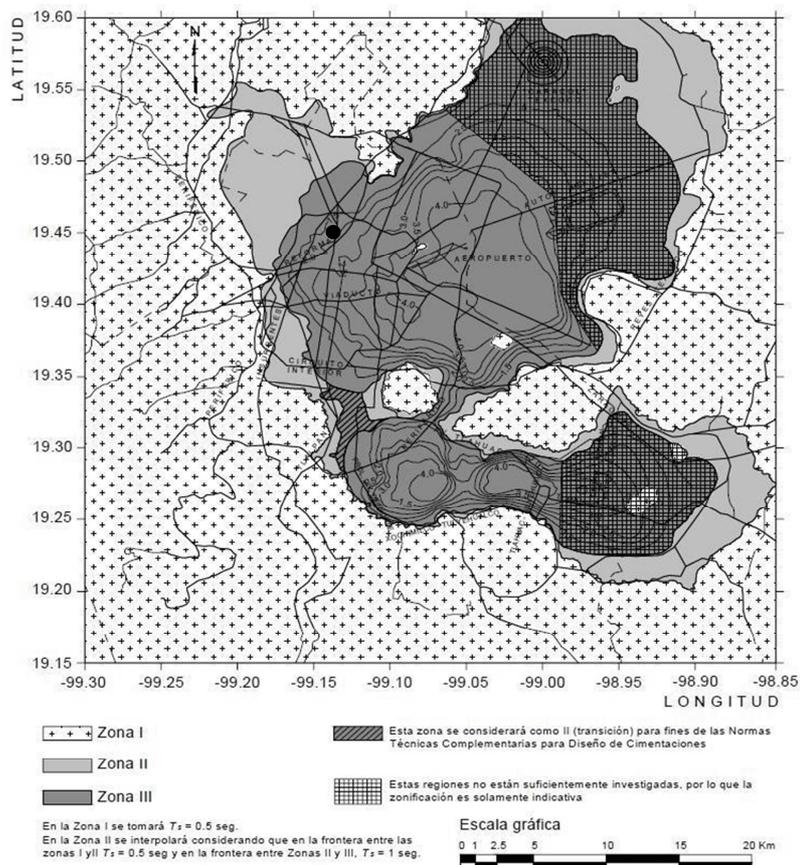


Figura 4.39 Periodos dominantes del suelo RCDF NTC Sismo (2004)

4.3.2 Aplicación de métodos

Como las lecturas se registraron en un punto cercano al centro de rigidez de la estructura y otro en uno de los extremos, resulta importante mencionar que en cada uno de los registros se observara no sólo la información relacionada con la dirección principal de medición, sino que, se contará también con información en la dirección perpendicular. Por lo tanto, el análisis deberá ser realizado en conjunto, tanto para las dos direcciones ortogonales, como para la obtención de los valores de torsión. Con base en los elementos que generan cada uno de los métodos se definirá cuáles propiedades corresponden a cada una de las direcciones de estudio.

Es decir, si se está revisando la gráfica de valores singulares para la aplicación del DDF, con los registros obtenidos en el centro de la estructura, en la dirección X también aparecerán valores correspondientes a periodos en dirección Y. Sin embargo, para determinar qué periodos corresponden a cada una de las direcciones se analizaran las dos gráficas (dirección X y Y). En caso de que un periodo correspondiente a un pico de amplificación aparezca en una dirección únicamente, este será asociado a la misma, en caso de que aparezca en las dos gráficas se podrá evaluar dependiendo la amplitud y, en su caso, comparar con los datos de torsión para determinar si el periodo corresponde a un comportamiento de torsión.

4.3.2.1 Análisis espectral convencional

En la figura 4.40 se presenta el espectro de Fourier del registro obtenido en la azotea en la dirección X. En el apéndice B se presentan los espectros de los pisos en ambas direcciones. Con la finalidad de mostrar que existen picos de amplificación correspondientes a un mismo periodo en dirección X como en Y, en la figura 4.41 se muestra el espectro del registro en la dirección Y.

En la tabla 4.46 se muestran los valores de los picos de amplificación localizados en los espectros generados a partir de los registros obtenidos en el centro y en un extremo de la estructura en dirección X, en la tabla 4.47 se muestran los correspondientes a la dirección Y.

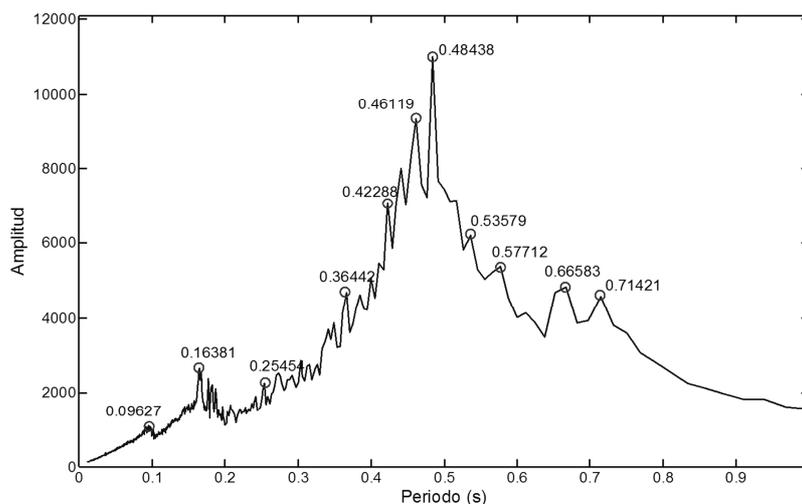


Figura 4.40 Espectro de Fourier del registro obtenido en el centro de la azotea dirección X

Tabla 4.46 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier dirección X

DIRECCIÓN X (CENTRO)								DIRECCIÓN X (EXTREMO)						
NIVEL								NIVEL						
P.B.	1	2	3	4	5	6	AZ	1	2	3	4	5	6	AZ
1.03	0.73	0.16	0.70	0.73	0.73	0.68	0.71	0.67	0.61	0.64	0.63	0.59	0.68	0.64
0.91	0.63	0.25	0.67	0.70	0.70	0.59	0.67	0.58	0.55	0.48	0.46	0.55	0.62	0.54
0.70	0.52	0.31	0.56	0.67	0.67	0.56	0.58	0.54	0.48	0.40	0.39	0.48	0.52	0.48
0.62	0.47	0.39	0.53	0.58	0.52	0.52	0.54	0.48	0.44	0.16	0.29	0.34	0.48	0.42
0.58	0.43	0.46	0.47	0.54	0.49	0.47	0.48	0.40	0.34	0.12	0.25	0.25	0.46	0.35
0.53	0.39	0.51	0.40	0.47	0.46	0.43	0.46	0.35	0.17	0.09	0.11	0.17	0.37	0.27
0.46	0.32	0.54	0.29	0.43	0.41	0.32	0.42	0.18	0.12		0.09	0.09	0.28	0.18
0.31	0.10	0.63	0.25	0.40	0.34	0.17	0.36	0.12	0.09				0.18	
0.08	0.07	0.71	0.16	0.29	0.26		0.25	0.09						
		0.07		0.25	0.17		0.16							
				0.18			0.10							
				0.16										

Tabla 4.47 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier dirección Y

DIRECCIÓN Y (CENTRO)								DIRECCIÓN Y (EXTREMO)						
NIVEL								NIVEL						
P.B.	1	2	3	4	5	6	AZ	1	2	3	4	5	6	AZ
0.73	0.67	0.61	0.64	0.63	0.59	0.68	0.64	0.64	0.16	0.73	0.63	0.59	0.68	0.64
0.64	0.58	0.55	0.48	0.46	0.55	0.62	0.54	0.44	0.10	0.51	0.46	0.55	0.62	0.54
0.60	0.54	0.48	0.40	0.39	0.48	0.52	0.48	0.33	0.48	0.37	0.39	0.48	0.52	0.48
0.51	0.48	0.44	0.16	0.29	0.34	0.48	0.42	0.25	0.44	0.28	0.29	0.34	0.48	0.42
0.48	0.40	0.34	0.12	0.25	0.25	0.46	0.35	0.17	0.34	0.22	0.25	0.25	0.46	0.35
0.39	0.35	0.17	0.09	0.11	0.17	0.37	0.27	0.12	0.17	0.18	0.11	0.17	0.37	0.27
0.27	0.18	0.12		0.09	0.09	0.28	0.18	0.06	0.12	0.10	0.09	0.09	0.28	0.18
0.23	0.12	0.09				0.18		0.06	0.12	0.10	0.09	0.09	0.28	0.18
0.17	0.09							0.09						
0.09														

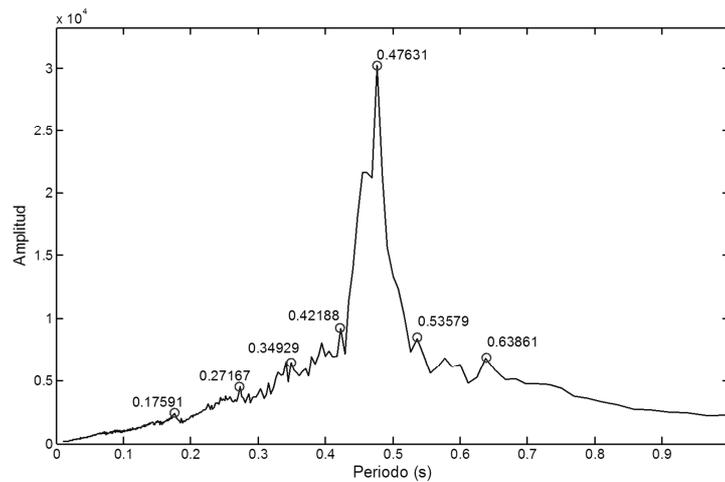


Figura 4.41 Espectro de Fourier del registro obtenido en el centro de la azotea dirección Y

Los datos presentados en las tablas 4.46 y 4.47 se revisaron para identificar qué periodos se presentan únicamente en una dirección, cuáles se presentan en las mediciones adquiridas en el centro o en los extremos y cuáles en ambas, para así definir cuáles serán los periodos en cada una de las direcciones de análisis.

En la tabla 4.48 se presentan los periodos asociados a cada una de las direcciones de análisis.

Tabla 4.48 Periodos asociados a las direcciones de análisis del edificio de concreto (AEC)

MODO	PERIODO (S)		
	DIRECCIÓN X	DIRECCIÓN Y	TORSIÓN
1	0.72	0.63	0.72
2	0.67	0.55	0.51
3	0.51	0.48	0.34
4	0.46	0.39	0.25
5	0.31	0.12	0.17
6	0.07	0.08	0.10

Una vez definidos los periodos es posible obtener las formas modales por medio de las funciones de transferencia y el ángulo de fase.

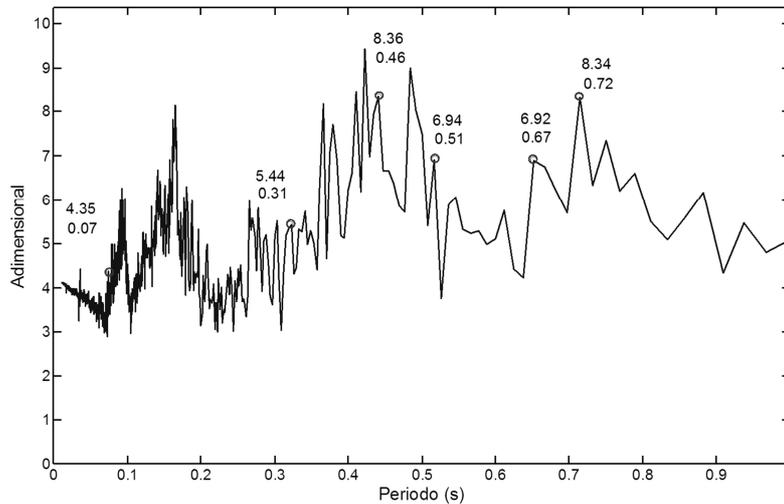


Figura 4.42 Función de transferencia entre P.B. y azotea. Dirección X

En la figura 4.42 se muestra la función de transferencia entre la planta baja y la azotea. Los picos correspondientes a los periodos definidos en la tabla 4.47 se indican con un círculo, en este caso los correspondientes a la dirección X. Se observa que hay algunos máximos que no han sido señalados debido a que corresponden a periodos en dirección Y o de torsión.

En la figura 4.43 se presenta una ampliación a la gráfica del ángulo de fase para la dirección Y para valores de periodo cercanos a 0.55 s.

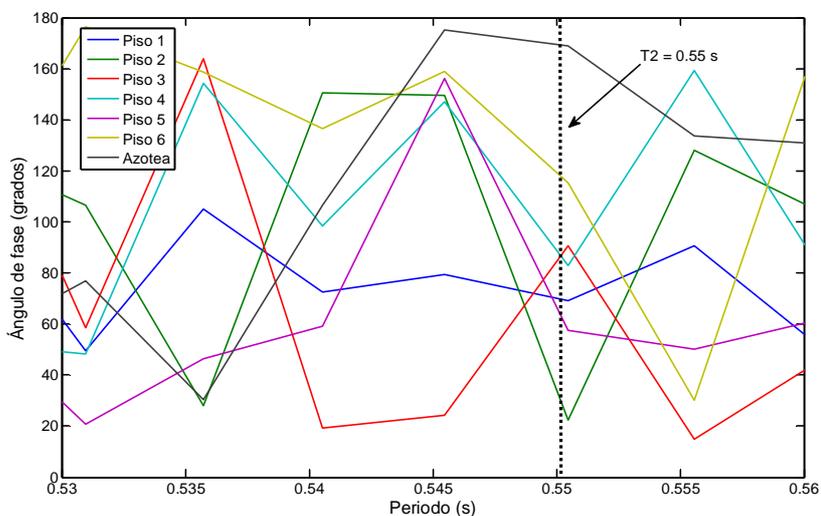


Figura 4.43 Ángulo de fase entre P.B. y niveles. Dirección Y. T2 = 0.55 s

En la tabla 4.49 se presentan las formas modales generadas por medio de la función de transferencia y el ángulo de fase, para la dirección X, en la tabla 4.50 y 4.51 se presentan para la dirección Y y torsión. En el apéndice B se muestran las gráficas de la función de transferencia y ángulo de fase de los niveles y direcciones restantes.

Tabla 4.49 Formas modales dirección X edificio de concreto (AEC)

PISO	PERIODO (s) y MODO					
	T1 = 0.72	T2 = 0.67	T3 = 0.51	T4 = 0.46	T5 = 0.31	T6 = 0.071
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.716	-0.963	0.963	0.816	0.987	0.849
5	0.498	0.553	0.755	-0.547	0.494	-0.605
4	0.525	-0.634	0.511	-0.623	-0.744	-0.659
3	0.342	0.429	0.408	0.391	0.361	-0.455
2	0.342	-0.311	-0.335	-0.301	0.356	-0.482
1	0.184	-0.212	0.316	-0.179	-0.334	0.345

Tabla 4.50 Formas modales dirección Y edificio de concreto (AEC)

PISO	PERIODO (s) y MODO					
	T1 = 0.63	T2 = 0.55	T3 = 0.48	T4 = 0.39	T5 = 0.12	T6 = 0.08
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	-0.856	0.700	-1.004	-0.828	0.763	0.832
5	-0.577	-0.380	-0.953	-0.462	0.642	0.731
4	-0.567	-0.427	0.667	-0.467	0.542	-0.684
3	-0.324	-0.181	0.299	-0.249	0.396	0.526
2	-0.250	-0.165	-0.244	0.248	0.389	-0.423
1	0.142	-0.141	-0.184	0.168	-0.302	0.523

Tabla 4.51 Formas modales de torsión del edificio de concreto (AEC)

PISO	PERIODO (s) y MODO					
	T1 = 0.72	T2 = 0.51	T3 = 0.34	T4 = 0.25	T5 = 0.17	T6 = 0.10
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.776	-0.735	0.688	-0.840	1.017	0.720
5	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI
4	0.536	-0.709	-1.088	-1.048	0.911	-0.907
3	-0.502	-0.572	-0.465	0.488	-0.492	1.176
2	0.274	-0.378	-0.338	-0.377	0.369	1.744
1	0.161	0.237	0.299	0.312	-0.297	0.380

IMI = Información modal incompleta

Como se puede observar en la tabla 4.51 para el quinto piso se tiene información modal incompleta, es decir, no se cuenta con la información necesaria para generar el valor de la forma modal. En el apéndice B se presenta gráficamente la configuración de las formas modales.

4.3.2.2 Descomposición en el dominio de la frecuencia

En la gráfica de valores singulares se identificaron los valores correspondientes a los periodos de vibración de la estructura asociados a cada dirección. Esta gráfica comúnmente se presenta en escala logarítmica. Sin embargo puede presentarse en escala decimal, en este caso se utilizaron las dos con el objetivo de tener el mayor número de herramientas para localizar los periodos de la estructura, así como verificar que en ambos casos los periodos coincidan.

En las figuras 4.44 y 4.45 se presentan para la dirección X de los registros realizados en el centro de la estructura, en el apéndice B se muestran las gráficas de los registro del extremo y ambos registros en la dirección Y.

En la tabla 4.52 y 4.53 se indican los periodos localizados en cada una de las gráficas en dirección X, dirección Y de los registros obtenidos en el centro de la estructura y en la dirección X y Y en los registros generados en un extremo de la estructura.

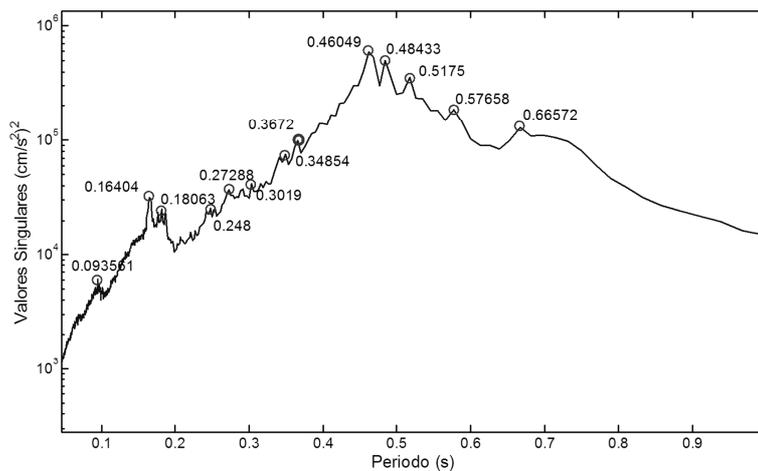


Figura 4.44 Variación de valores singulares escala logarítmica dirección X, registro del centro de la estructura

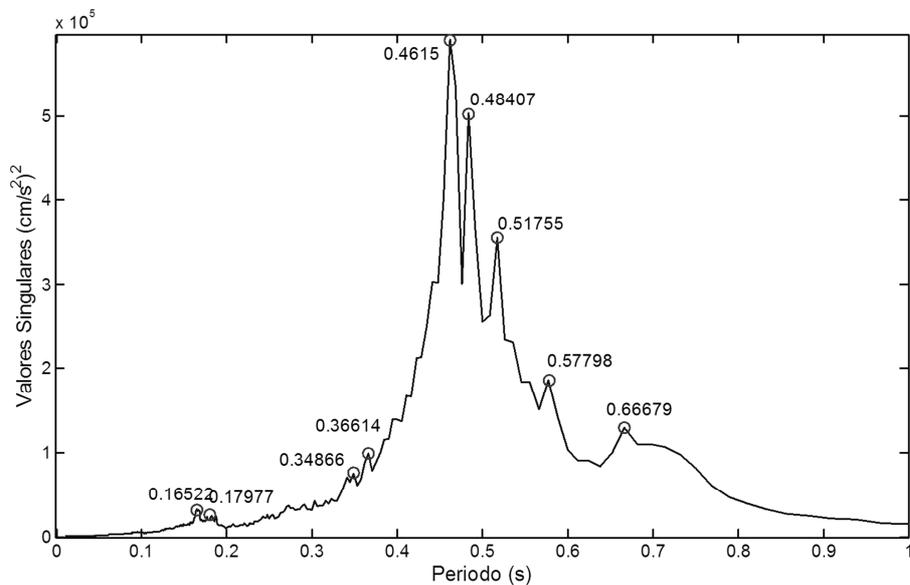


Figura 4.45 Variación de valores singulares escala decimal dirección X, registro del centro de la estructura

Tabla 4.52 Periodos (s) localizados por medio de gráficas de valores singulares dirección X

DIRECCIÓN X (CENTRO)		DIRECCIÓN X (EXTREMO)	
ESCALA		ESCALA	
LOGARITMICA	DECIMAL	LOGARITMICA	DECIMAL
0.67	0.67	0.73	0.73
0.58	0.58	0.68	0.68
0.52	0.52	0.65	0.65
0.48	0.48	0.59	0.59
0.46	0.46	0.55	0.50
0.37	0.37	0.50	0.46
0.35	0.35	0.46	0.43
0.30	0.18	0.43	0.40
0.27	0.17	0.40	0.38
0.25		0.38	0.36
0.18		0.36	0.16
0.16		0.25	0.10
0.09		0.17	
		0.10	

Tabla 4.53 Periodos (s) localizados por medio de gráficas de valores singulares dirección Y

DIRECCIÓN Y (CENTRO)		DIRECCIÓN Y (EXTREMO)	
ESCALA		ESCALA	
LOGARITMICA	DECIMAL	LOGARITMICA	DECIMAL
0.64	0.64	0.54	0.55
0.58	0.48	0.47	0.47
0.48	0.34	0.40	0.40
0.42		0.37	0.38
0.34		0.34	0.34
0.27		0.31	0.31
0.25		0.17	
0.18		0.16	
0.15		0.10	
0.10			

En la tabla 4.54 se presentan los periodos que se definieron para cada una de las direcciones de análisis.

Tabla 4.54 Periodos definidos en las direcciones de análisis del edificio de concreto (DDF)

MODO	PERIODO (S)		
	DIRECCIÓN X	DIRECCIÓN Y	TORSIÓN
1	0.67	0.63	0.73
2	0.58	0.48	0.54
3	0.51	0.34	0.51
4	0.46	0.25	0.46
5	0.34	0.18	0.34
6	0.16		0.10

Una vez definidos los periodos es posible obtener las formas modales por medio de la descomposición de valores singulares DVS. Para esto es necesario identificar la matriz de densidad espectral de cada uno de los valores de periodo localizados. En la tabla 4.55 se presenta el número de matriz correspondiente a cada uno de los periodos.

Tabla 4.55 Identificación de matriz de densidad espectral asociada a periodos de vibración

DIRECCIÓN X		DIRECCIÓN Y		TORSIÓN	
PERIODO (s)	MATRIZ	PERIODO (s)	MATRIZ	PERIODO (s)	MATRIZ
0.67	46	0.63	48	0.73	42
0.58	53	0.48	64	0.54	55
0.51	59	0.34	89	0.51	61
0.46	66	0.25	122	0.46	66
0.34	89	0.18	163	0.34	89
0.16	183			0.1	313

Una vez aplicada la descomposición de valores singulares a las matrices de densidad espectral se obtienen las formas modales correspondientes. En la tabla 4.56 se presentan las formas modales generadas para la dirección X, en la tabla 4.57 y 4.58 se presentan para la dirección Y y torsión.

Tabla 4.56 Formas modales dirección X edificio de concreto (DDF)

PISO	PERIODO (s) y MODO					
	T1 = 0.67	T2 = 0.58	T3 = 0.51	T4 = 0.46	T5 = 0.34	T6 = 0.16
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.690	0.702	-0.922	-0.901	0.666	0.566
5	0.529	-0.533	0.753	-0.652	-0.562	-0.511
4	0.649	0.822	0.507	0.680	0.566	-0.476
3	0.435	0.353	0.393	-0.401	-0.306	0.346
2	0.283	-0.323	0.331	0.390	-0.303	0.206
1	0.168	-0.226	0.309	-0.183	-0.184	0.113

Tabla 4.57 Formas modales dirección Y edificio de concreto (DDF)

PISO	PERIODO (s) y MODO				
	T1 = 0.63	T2 = 0.48	T3 = 0.34	T4 = 0.25	T5 = 0.16
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.755	0.584	-0.654	0.770	-0.672
5	-0.518	0.610	0.545	0.567	0.556
4	-0.546	-0.413	-0.412	-0.689	0.528
3	-0.341	0.297	0.257	0.275	0.242
2	-0.215	0.171	0.162	0.167	0.162
1	-0.107	-0.099	0.104	-0.104	-0.148

Tabla 4.58 Formas modales de torsión del edificio de concreto (DDF)

PISO	PERIODO (s) y MODO					
	T1 = 0.73	T2 = 0.54	T3 = 0.51	T4 = 0.46	T5 = 0.34	T6 = 0.10
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.783	0.801	-0.839	-0.601	-0.634	-0.697
5	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI
4	0.410	0.883	0.719	0.605	1.048	0.915
3	0.510	0.626	0.455	0.585	-0.374	-1.412
2	0.235	0.314	-0.230	0.301	-0.352	1.741
1	0.082	-0.205	0.211	-0.240	-0.220	-0.392

IMI = Información modal incompleta

Como se aprecia en las tablas 4.56, 4.57 y 4.58, se fue capaz de identificar seis periodos para la dirección X así como de torsión, para la dirección Y solo se fue capaz de identificar cinco periodos. En el apéndice B se presentan gráficamente la configuración de las formas modales.

4.3.2.3 Análisis de componentes independientes

A partir de la extracción de fuentes por medio del ACI y la generación de los espectros de Fourier de cada una de ellas es posible identificar los periodos. En los ejemplos anteriores (modelos bidimensional y tridimensional) en cada uno de los espectros de las fuentes se generaba un pico de amplificación que se destacaba del resto, el cual correspondía a uno de los periodos de vibración. Sin embargo, en esta ocasión no se presenta dicha amplificación en uno solo de los picos, si no que se presenta en varios de ellos. En la figura 4.46 se presentan los espectros de las fuentes generadas a partir de los registros obtenidos en el extremo de la estructura en la dirección X.

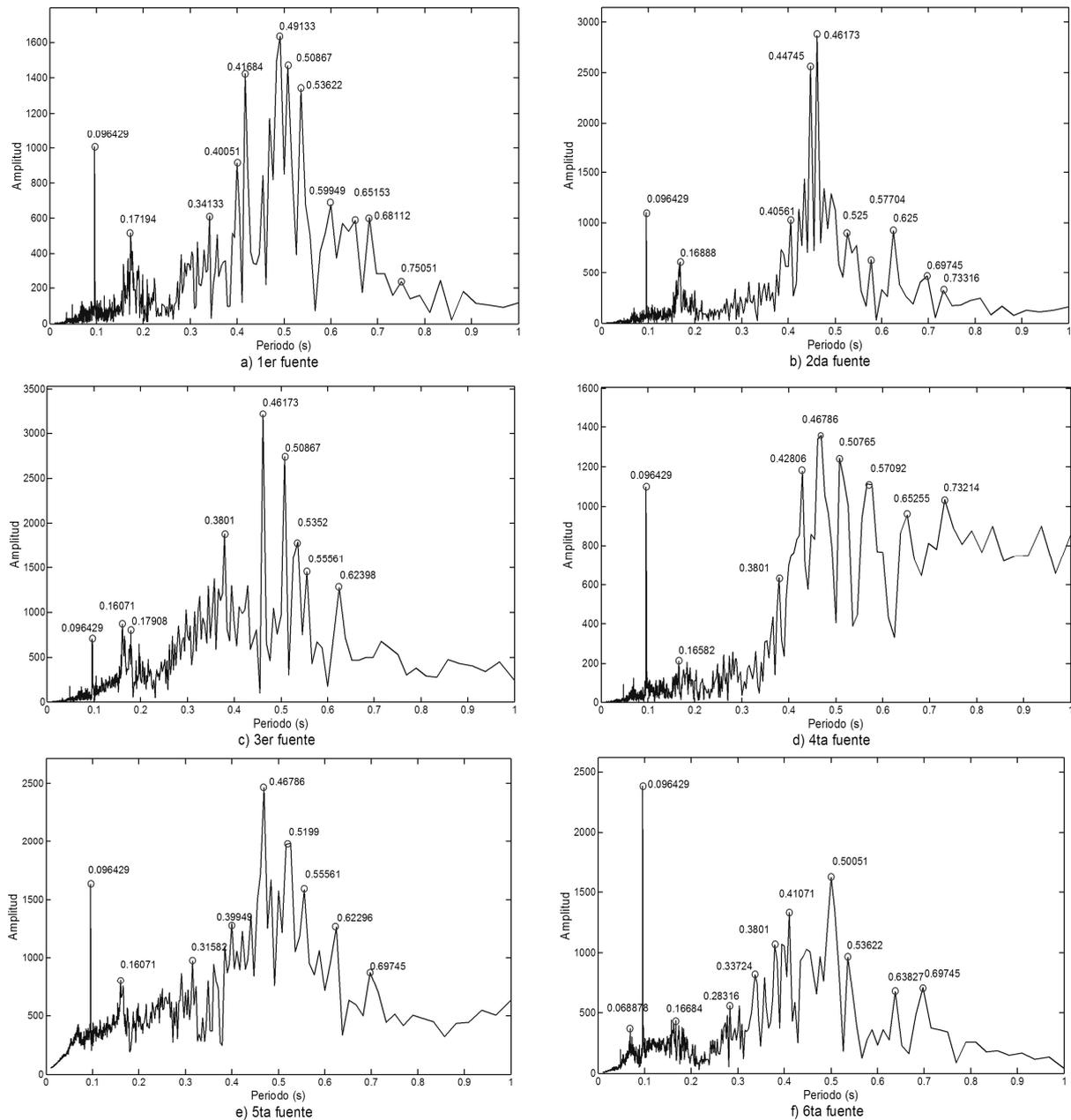


Figura 4.46 Espectros de Fourier de las fuentes obtenidas en el extremo en dirección X

En la figura 4.47 se presentan los que corresponden a los registros obtenidos en el centro en la misma dirección, los espectros de los registros en dirección Y se muestran en el apéndice B.

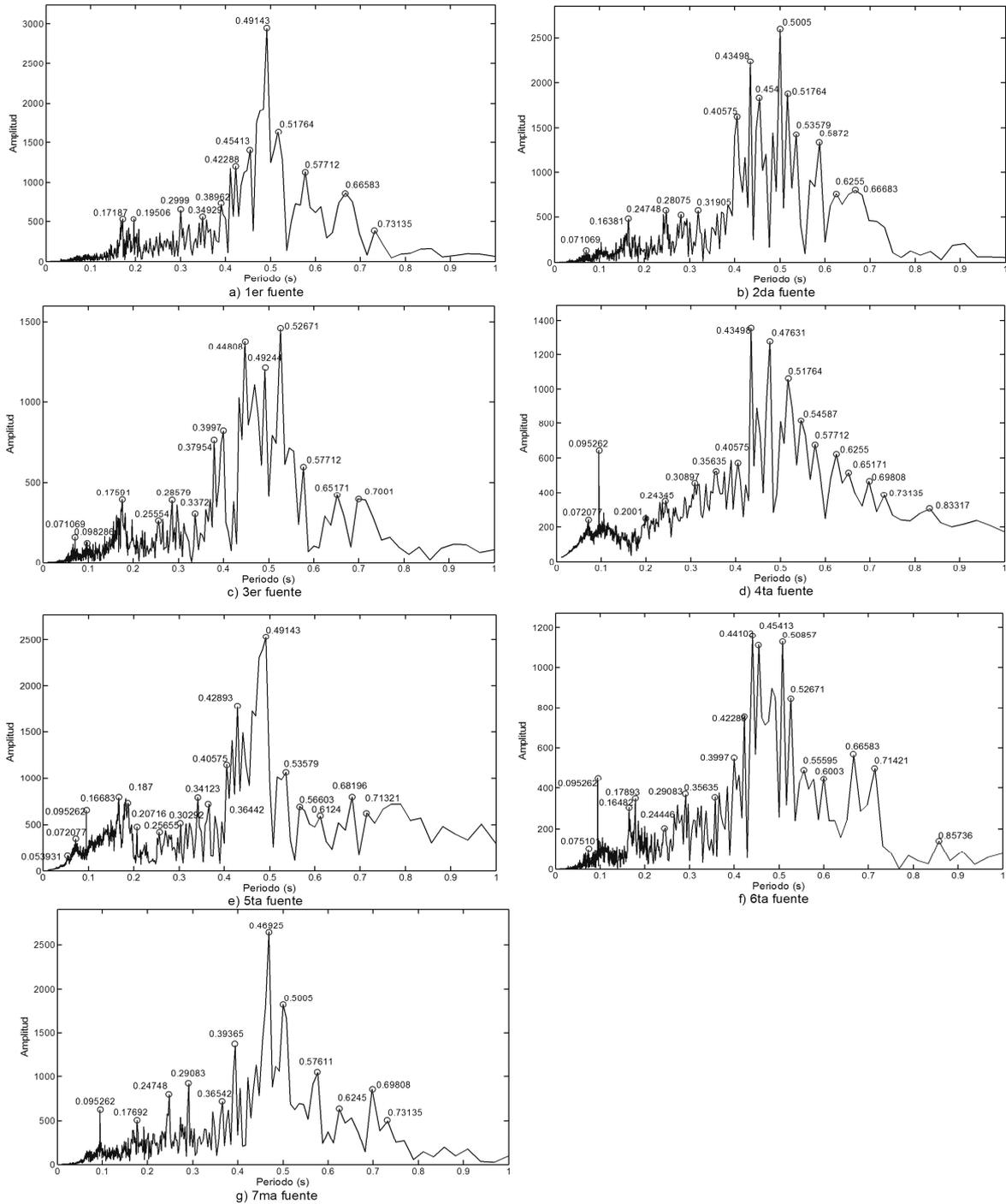


Figura 4.47 Espectros de Fourier de las fuentes obtenidas en el centro en dirección X

En la tabla 4.59 y 4.60 se indican los periodos localizados en cada una de las gráficas en dirección X y dirección Y respectivamente.

Tabla 4.59 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier de las fuentes dirección X

DIRECCIÓN X (CENTRO)							DIRECCIÓN X (EXTREMO)					
FUENTE							FUENTE					
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6
0.73	0.67	0.70	0.73	0.71	0.71	0.73	0.75	0.73	0.62	0.73	0.70	0.70
0.67	0.63	0.65	0.70	0.68	0.67	0.70	0.68	0.70	0.56	0.65	0.62	0.64
0.58	0.59	0.58	0.65	0.61	0.60	0.62	0.65	0.63	0.51	0.57	0.56	0.54
0.52	0.54	0.53	0.63	0.57	0.56	0.58	0.60	0.58	0.46	0.51	0.52	0.50
0.49	0.52	0.49	0.58	0.54	0.53	0.50	0.54	0.53	0.38	0.47	0.47	0.41
0.45	0.50	0.45	0.55	0.49	0.51	0.47	0.51	0.46	0.18	0.43	0.40	0.38
0.42	0.45	0.40	0.52	0.43	0.45	0.39	0.49	0.45	0.16	0.38	0.32	0.34
0.39	0.43	0.38	0.48	0.41	0.44	0.37	0.42	0.41	0.10	0.17	0.16	0.28
0.35	0.41	0.34	0.43	0.34	0.42	0.29	0.40	0.17		0.10	0.10	0.17
0.30	0.32	0.29	0.41	0.30	0.40	0.25	0.34	0.10				0.10
0.20	0.28	0.26	0.36	0.26	0.36	0.18	0.17					0.07
0.17	0.25	0.18	0.31	0.21	0.29	0.10	0.10					
	0.16	0.10	0.24	0.19	0.24							
	0.07	0.07	0.20	0.17	0.18							
			0.10	0.10	0.16							
			0.07	0.07	0.10							
				0.05	0.08							

Tabla 4.60 Periodos (s) localizados en los espectros de Fourier de las fuentes dirección Y

DIRECCIÓN Y (CENTRO)							DIRECCIÓN Y (EXTREMO)					
FUENTE							FUENTE					
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6
0.63	0.70	0.54	0.63	0.61	0.68	0.67	0.75	0.73	0.76	0.73	0.77	0.61
0.53	0.64	0.47	0.59	0.57	0.63	0.63	0.67	0.58	0.67	0.64	0.71	0.54
0.46	0.52	0.44	0.49	0.46	0.58	0.58	0.55	0.55	0.58	0.57	0.64	0.50
0.43	0.47	0.41	0.42	0.43	0.53	0.54	0.50	0.49	0.50	0.48	0.56	0.47
0.35	0.39	0.31	0.38	0.35	0.45	0.49	0.48	0.42	0.47	0.45	0.46	0.45
0.28	0.36	0.12	0.29	0.25	0.39	0.48	0.42	0.34	0.43	0.40	0.36	0.38
	0.30		0.26	0.18	0.37	0.44	0.41	0.25	0.41	0.34	0.25	0.34
	0.28		0.26	0.12	0.25	0.40	0.36	0.17	0.38	0.27	0.17	0.32
	0.22		0.18	0.08	0.17	0.36	0.29	0.10	0.34	0.18	0.12	0.17
	0.17		0.10		0.08	0.29	0.17		0.32	0.12	0.08	0.10
	0.12					0.19			0.27	0.10		
						0.12			0.17			
						0.08			0.10			

Los datos presentados en las tablas 4.59 y 4.60 se comparan para identificar qué periodos únicamente se presentan en una dirección, cuales se presentan en las mediciones adquiridas en el centro o en los

extremos y cuales en ambas, para así definir cuáles serán los periodos en cada una de las direcciones de análisis.

Por ejemplo, se observa que en las fuentes generadas para la dirección X obtenidas en el centro se encuentra el periodo de 0.07 s, esta valor no se presenta en ni uno de los espectros generados en dirección Y, y solo se presenta una vez en las fuentes generadas en el extremo, por lo que se puede concluir que dicho valor corresponde a un periodo de vibración en dirección X.

En la tabla 4.61 se presentan los periodos de vibración definidos para cada una de las direcciones de análisis.

Tabla 4.61 Periodos de vibración definidos en las direcciones de análisis edificio de concreto (ACI)

MODO	PERIODO (S)		
	DIRECCIÓN X	DIRECCIÓN Y	TORSIÓN
1	0.72	0.63	0.72
2	0.66	0.55	0.63
3	0.58	0.48	0.51
4	0.51	0.43	0.46
5	0.46	0.18	0.39
6	0.31	0.12	0.34
7	0.16	0.08	0.25
8	0.07		0.1

Se generaron las formas modales por medio de las funciones de transferencia y el ángulo de fase. En la tablas 4.62 a 4.64 se presentan las formas modales para la dirección X, dirección Y y torsión.

Tabla 4.62 Formas modales dirección X edificio de concreto (ACI)

PISO	PERIODO (s) Y MODO							
	T1 = 0.72	T2 = 0.66	T3 = 0.58	T4 = 0.51	T5 = 0.46	T6 = 0.31	T7 = 0.16	T8 = 0.07
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.716	-0.694	0.764	0.578	0.902	0.673	-0.712	0.729
5	0.598	-0.536	0.547	0.595	-0.652	0.501	0.547	-0.494
4	0.503	0.649	0.828	0.549	-0.688	-0.572	-0.582	-0.616
3	0.343	0.440	0.399	0.375	0.402	0.284	-0.356	-0.410
2	0.344	-0.285	0.340	0.406	-0.392	0.288	-0.218	-0.421
1	0.183	0.169	-0.230	0.197	-0.185	-0.266	0.165	0.354

Tabla 4.63 Formas modales dirección Y edificio de concreto (ACI)

PISO	PERIODO (s) Y MODO						
	T1 = 0.63	T2 = 0.55	T3 = 0.48	T4 = 0.43	T5 = 0.18	T6 = 0.12	T7 = 0.08
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	-0.756	0.946	-0.854	1.283	-0.972	-0.725	0.694
5	-0.588	-0.755	-0.722	0.813	-0.588	-0.498	0.636
4	-0.546	-0.656	0.400	0.612	-0.614	-0.526	0.682
3	0.341	-0.360	0.293	0.455	-0.241	0.383	0.594
2	-0.217	-0.326	-0.195	0.349	0.221	0.265	0.534
1	0.110	-0.165	-0.125	0.114	0.260	-0.261	-0.451

Tabla 4.64 Formas modales de torsión del edificio de concreto (ACI)

PISO	PERIODO (s) Y MODO							
	T1 = 0.72	T2 = 0.66	T3 = 0.58	T4 = 0.51	T5 = 0.46	T6 = 0.31	T7 = 0.16	T8 = 0.07
AZ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	0.865	0.694	-0.553	-0.602	-0.730	0.634	-0.898	0.770
5	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI	IMI
4	0.575	0.907	-0.733	-0.736	1.122	-1.049	-1.019	0.953
3	-0.479	-0.469	-0.380	-0.585	-0.473	-0.375	0.478	-0.512
2	0.292	-0.325	-0.281	-0.310	-0.427	-0.353	-0.394	0.464
1	0.174	-0.220	0.181	0.240	0.288	0.220	0.359	-0.434

IMI = Información modal incompleta

Como se observa en las figuras y tablas anteriores, se fue capaz de identificar ocho periodos para la dirección X así como de torsión y para la dirección Y se fue capaz de identificar siete periodos.

En el apéndice B se presentan gráficamente las configuraciones de las formas modales.

4.3.3 Análisis y comparación de resultados

4.3.3.1 Periodos

En las tablas 4.65 a 4.67 se presentan los periodos identificados con cada uno de los métodos:

Tabla 4.65 Periodos (s) del edificio de concreto localizados en la dirección X

MODO	DIRECCIÓN X		
	MÉTODO		
	AEC	DDF	ACI
1	0.72		0.72
2	0.67	0.67	0.66
3		0.58	0.58
4	0.51	0.51	0.51
5	0.46	0.46	0.46
6		0.34	
7	0.31		0.31
8		0.16	0.16
9		0.07	0.07

Como se observa en la tabla 4.65 con el ACI se identificaron ocho periodos y con el AEC cinco y con el DDF solo seis.

De los ocho periodos localizado con ACI todos aparecen por lo menos en uno de los otros métodos, es decir, por medio del ACI se identificó el periodo correspondiente a 0.72 s que también se obtuvo por medio del AEC, sin embargo, no fue posible identificarlo con el DDF, en contraparte el periodo 0.58 s localizado con ACI y DDF no se pudo identificar con el AEC, lo que ratifica que los periodos generados por medio del ACI pueden ser considerados como periodos de vibración de la estructura.

Tabla 4.66 Periodos (s) del edificio de concreto localizados en la dirección Y

MODO	DIRECCIÓN Y		
	MÉTODO		
	AEC	DDF	ACI
1	0.63	0.63	0.63
2	0.55		0.55
3	0.48	0.48	0.48
4			0.43
5	0.39		
6		0.34	
7		0.18	0.18
8	0.12		0.12
9	0.08		0.08

En la tabla 4.66 se observa que el ACI fue capaz de identificar un número mayor de periodos, los cuales también están representados en los resultados obtenidos por el AEC y el DDF. De estos resultados es importante resaltar que los tres métodos identificaron el periodo correspondiente a 0.63 s, el cual más adelante se observara en la configuración de su forma modal que corresponde a un primer modo de vibración.

Tabla 4.67 Periodos (s) de torsión localizados para el edificio de concreto

MODO	TORSIÓN		
	MÉTODO		
	AEC	DDF	ACI
1	0.72	0.73	0.72
2			0.63
3		0.54	
4	0.51		0.51
5		0.46	0.46
6			0.39
7	0.34	0.34	0.34
8			0.25
9	0.17		
10	0.10	0.10	0.10

Al observar los resultados de las tablas anteriores es importante resaltar el hecho de que existen periodos que se presentan en una de las direcciones ortogonales así como en los periodos de torsión, lo que puede representar la existencia de periodos de flexotorción, es decir se presenta un desplazamiento conjunto de un giro, dicho comportamiento resulta ser mucho más común que un desplazamiento o giro aislado.

De acuerdo con el manual de la sociedad americana de ingenieros civiles, el periodo de un edificio puede llegar a ser aproximado con la ecuación (4.2), con base, en sus propiedades físicas.

$$T_a = C_t * H_m^{0.75} \quad (4.2)$$

Donde T_a será el periodo de la estructura, C_t dependerá de la configuración estructural, en este caso $C_t = 0.073$ correspondiente a marcos de concreto y H_m es la altura del edificio ($H_m = 22m$).

$$T_a = 0.74s$$

Con base en lo anterior el periodo en la dirección X $T_1 = 0.72s$ obtenido con AEC y ACI puede considerarse como el periodo correspondiente al primer modo.

4.3.3.2 Formas modales

A continuación se mostraran las gráficas de la configuración de las formas modales, debido a que no se pueden catalogar por modos, se realizará una diferencia con base en el valor del periodo. Se mostrará la configuración de las formas modales de los periodos que coinciden en los tres métodos y en otra figura formas modales obtenidas por el ACI que solo coinciden con uno de los dos métodos.

En la figura 4.48 se presenta la configuración de las formas modales en la dirección X de los periodos localizados en los tres métodos, en la figura 4.49 se presenta un ejemplo de la configuración de los periodos que se localizaron en solo dos de los métodos.

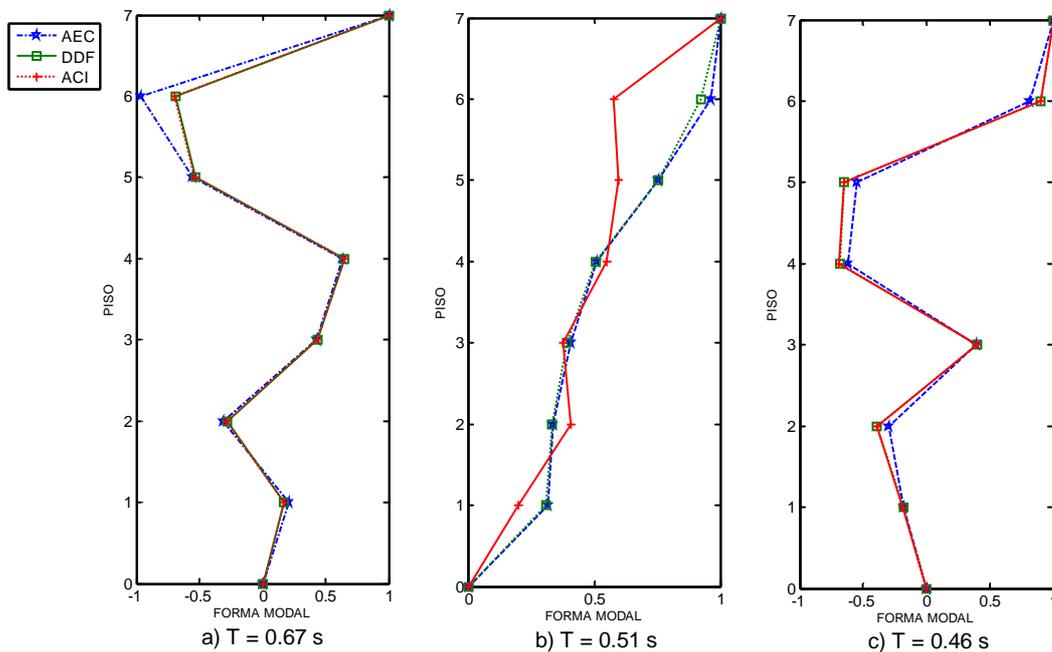


Figura 4.48 Configuración de formas modales identificadas con los tres métodos dirección X

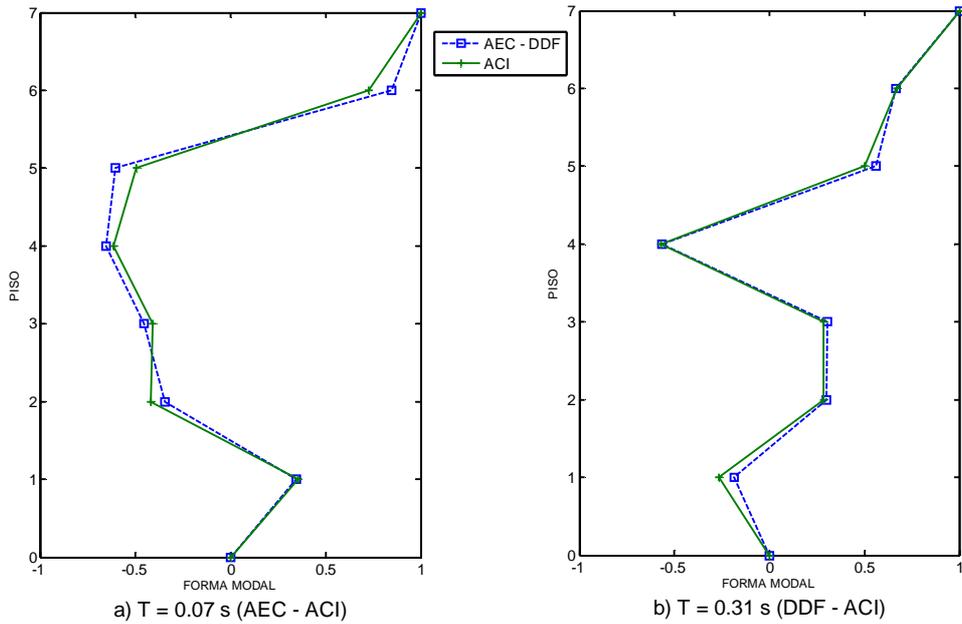


Figura 4.49 Configuración de formas modales encontradas con (ACI-AEC) y (ACI-DDF) dirección X

Como se observa en las figuras 4.48 y 4.49 la configuración de las formas modales se asemeja mucho en los tres métodos, y en el caso en que solo se logró localizar el periodo con el ACI y con uno de los otros métodos (AEC o DDF) la configuración es casi idéntica, lo que puede corroborar la conclusión de que corresponden a modos de vibración de la estructura.

En las figuras 4.50 y 4.51 se presentan los mismos caso pero en la dirección Y.

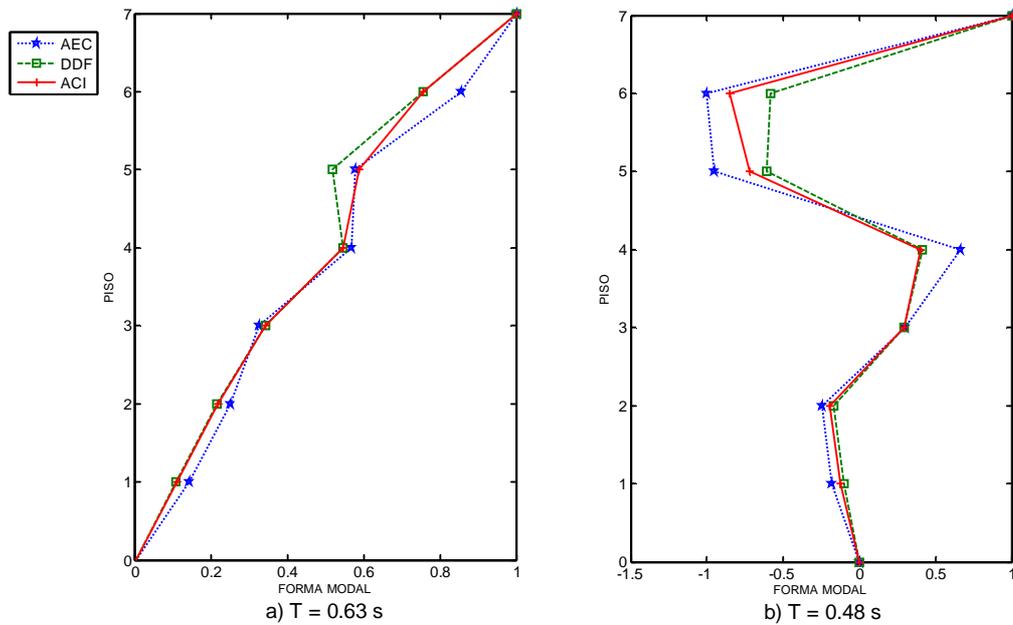


Figura 4.50 Configuración de formas modales identificadas con los tres métodos dirección Y

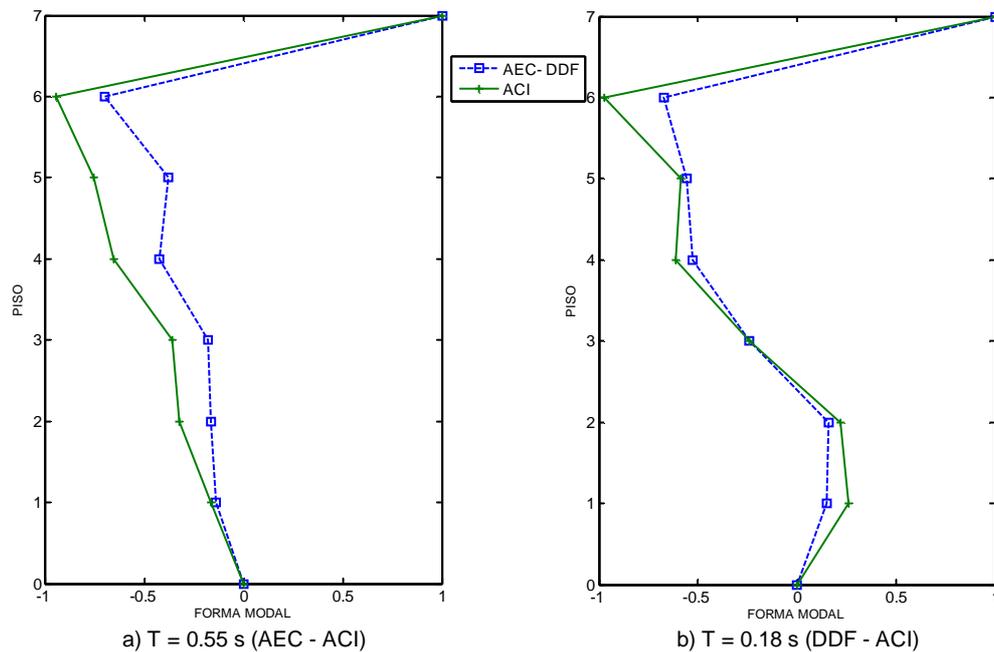


Figura 4.51 Configuración de formas modales encontradas con (ACI-AEC) y (ACI-DDF) dirección Y

En la dirección Y se presenta el mismo caso, la configuración de las formas modales coincide de manera representativa, lo cual lleva a la conclusión de que los periodos encontrados por los distintos métodos corresponde a periodos de vibración propios del sistema.

4.3.3.3 Conclusiones

Al revisar los periodos encontrados por cada uno de los métodos, se identificó que con base en las herramientas que genera el ACI (espectros de Fourier de las fuentes) se fue capaz de localizar un mayor número de máximos de amplificación, los cuales generaron como resultado contar con un número mayor de periodos que los localizados en los espectros de Fourier (AEC) y en las gráficas de variación de valores singulares (DDF), al comparar los periodos que se definieron con cada uno de los métodos, se encontró que los identificados con el ACI también fueron identificados por lo menos por uno de los otros dos métodos, lo que hace pensar que estos periodos pueden corresponder a periodos de vibración de la estructura.

Para contar con más información que certifique la conclusión de que los periodos localizados son efectivamente periodos de vibración de la estructura se generaron las configuraciones de las formas modales para determinar si existe relación entre las mismas y en caso de existir, poder inferir que efectivamente se localizó un periodo de vibración propio de la estructura, lo cual después de revisar dichas configuraciones se comprobó.

Sin embargo, cabe mencionar que únicamente se presentó la configuración típica de una forma modal en el primer modo, lo que dificulta dar por hecho que los demás periodos corresponden a una forma modal en específico. Es decir no se puede garantizar que el siguiente periodo sea efectivamente el correspondiente al segundo modo de vibración en una dirección en específico, si no, que probablemente se localizaron periodos de formas modales acopladas.

Con base en lo anterior se puede decir que el ACI es un método con el cual se pueden localizar periodos de vibración utilizando registros obtenidos por medio de pruebas de vibración ambiental. Sin embargo, igual que con los otros dos métodos, no garantiza la obtención específica de todos los periodos ni de la configuración de sus formas modales, nuevamente la interpretación de los datos depende totalmente de la persona que trabaje con ellos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se realizó la comparación de dos de los métodos más utilizados de obtención de propiedades dinámicas de las estructuras (periodos de vibración y formas modales), el análisis espectral convencional (AEC) y descomposición en el dominio de la frecuencia (DDF), con un método de identificación y descomposición de señales conocido como el análisis de componentes independientes (ACI) originalmente utilizado en otros campos de estudio, con el objetivo de identificar las ventajas y desventajas que presentan cada uno de ellos en los elementos que proporcionan para la identificación de periodos de vibración y obtención de formas modales de estructuras a partir de los registros obtenidos de una prueba de vibración ambiental. Se identificaron las propiedades dinámicas de dos modelos teóricos, un marco bidimensional y uno tridimensional, suponiendo que están instrumentados y sujetos a una excitación sísmica.

A partir de los resultados obtenidos para los casos estudiados, se puede concluir que, para el marco bidimensional, la identificación de periodos y formas modales con el ACI proporcionó los resultados con menor error y más cercanos a los valores teóricos, lo que indica que ACI resulta ser un método de fácil interpretación visual para la selección de picos.

En el caso tridimensional los métodos de AEC y DDF proporcionaron algunos modos de vibración con errores relativos mayores o muy cercanos al 10% mientras que los resultados generados con ACI se mantuvieron por debajo del 5%.

Finalmente se aplicaron los métodos a los registros obtenidos de una prueba de vibración ambiental realizada a un edificio de concreto de siete pisos ubicado en la ciudad de México, con el objetivo de apreciar las ventajas y desventajas del ACI con respecto a los otros métodos (AEC y DDF) al momento de trabajar con señales reales.

Con base en los resultados obtenidos se pudo observar que el ACI no se comporta de igual manera al trabajar con registros adquiridos por medio de modelos computacionales ya que al realizar el espectro de Fourier de las fuentes no se presentó un único máximo de amplificación en ellos. Sin embargo, si se pudo observar una reducción del número de picos, así como una amplificación de algunos de ellos, lo que nuevamente facilitó la identificación de periodos.

Al comparar los resultados obtenidos por los otros dos métodos se pudo observar que los periodos localizados por el AEC y DDF también fueron identificados por medio del ACI ya que dichos valores coincidían en los resultados de los tres métodos, es importante resaltar que al utilizar ACI se fue capaz de identificar un número mayor de periodos lo que a su vez implica contar con mayor información para el posterior procesamiento de la información, ya sea para realizar la actualización de algún modelo o en busca de identificar y cuantificar el daño en elementos estructurales.

Con respecto a la aplicación de ACI, se puede concluir que para modelos desarrollados en programas computacionales, los cuales nos garantiza la obtención de registros sin ruido, el método presenta resultados con errores menores al 5% tanto para modelos bidimensionales como tridimensionales, el cual es considerablemente menor a los errores que generaron los otros dos métodos. Para el caso de los

registros obtenidos de un edificio real con el ACI se fue capaz de identificar un número mayor de periodos que los otros métodos y aunque la información no se presenta de manera tan clara como en los modelos teóricos, sí se puede identificar que en los espectros de Fourier de las fuentes los picos cuentan con una amplitud mayor, lo que facilita su selección.

Con base en las conclusiones anteriores se puede decir que el objetivo de este trabajo de presentar un método que facilite la obtención de periodos de vibración por medio de registros obtenidos de pruebas de vibración ambiental se cumplió.

Como trabajo a futuro se recomienda automatizar lo más posible los métodos para la identificación de propiedades dinámicas esto con el objetivo de poder utilizar dichas propiedades para la identificación y cuantificación automática de daño en elementos estructurales, por la naturaleza de los métodos, basados en la interpretación por parte de un analista, no es posible automatizarlos por completo, sin embargo, el ACI y el DDF permiten conociendo los periodos obtener de manera automática las formas modales, aunque la interpretación de los elementos para la obtención de periodos resulta más sencilla utilizando los espectros de Fourier de las fuentes generadas por el ACI.

Finalmente es muy importante mencionar que en los tres métodos presentados la interpretación de los datos y por lo mismo la obtención de resultados depende totalmente del criterio y experiencia de la persona que trabaje con ellos.

REFERENCIAS

- Andersen, P., (1997), **“Identification of the civil engineering structures using vector ARMA models”**, tesis de doctorado, Aalborg University, Dinamarca.
- Bendat J.S., y Piersol A.G., (1986), **“Random data. Analysis and measurement procedure”**, Wiley Interscience, New York.
- Bernal D, y Gunes B., (2000), **“Performance of an observer state-space identification in the presence of mild nonlinearities”**, American Control Conference, Chicago, Illinois, 2, pp. 986-990.
- Brincker, R., Zhang, L. y Andersen, P., (2000), **“Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition”**. *18th International Modal Analysis Conference (IMAC XVIII)*, pp. 625-630, San Antonio, Texas.
- Brown, D. L., Allemang, R. J., Zimmerman, R., y Mergeay, M., (1979), **“Parameter estimation techniques for modal analysis”**. *SAE Technical Paper 790221*.
- Cherng, A. P., (2003) **“Optimal sensor placement for modal parameter identification using signal subspace correlation techniques”**, *Mechanical systems and signal processing*. Vol 17, No. 2 China, pp 361-378.
- Comon, P., (1994), **“Independent component analysis – a new concept?”**, *Signal processing*, 36, pp 36:287-314.
- De Lathauwer L., De Moor B, y Vandewalle J., (2000), **“An introduction to independent component analysis”**, *Journal of Chemometrics J. Chemometrics 2000*; pp. 14: 123-149
- Dobson, B.J., (1987), **“A straight-line technique for extracting modal properties from frequency response data”**, *Mech. Syst. Signal Process*, pp 1, 29-40.
- Ewins, D. J., y Gleeson, P. T., (1982), **“A method for modal identification of lightly damped structures”**, *J. Sound Vib*; pp. 84: 57-79
- Ewins, D. J., (1984), **“Model validation: Correlation for updating”**, *Indian Academy Sciences*; pp. 25: 221-246
- Finch, P. D., (1960), **“On the covariance determinants of moving average and autoregressive models.”**, *Biometrika*; pp. 47: 6-194
- Ghali A, Nevill AM., (1989) **“Structural analysis: a unified classical and matrix approach.”** 3rd edition. New York: Chapman and Hall.
- Gawronski, W., (1998), **“Dynamics and control of structures: A modal approach”**, *Mechanical Engineering Series*, pp 23.
- Hyvärinen A., (1999), **“Survey on independent component analysis”**, *Neural Computing Surveys*, pp 2, 94-128.
- Hyvärinen A., y Oja E., (2000), **“Independent component analysis: algorithms and applications.”**, *Neural Networks Research Centre, Helsinki University of Technology, Finland*

- Ibrahim, S. R., y Mikulcik, E. C., (1973), **“A time domain modal vibration test technique.”** Shock Viv. Bull. Pp 43(4): 21-37
- Jutten C., y Herault J., (1991), **“Blind separation sources, Part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture”**, Signal Procession; pp. 24: 1-10
- Kennedy C. C., y Pancu C.D.P., (1947), **“Use of vectors in vibration measurement and analysis”**, *J. Aeronaut. Sci*; pp.14: 603-625
- Lieven, N. A. J., y Ewins D.J., (1988), **“Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC).”**, *Proceedings of the international modal analysis conference. 1988*
- Link, M., y Vollan, A., (1978), **“Identification of structural system parameters from dynamic response data”**, *Z. Flugwiss. Weltraumforsch*; pp.2: 165-174
- Maia, N.M. M. y Silva, J. M. M., (2001) **“Modal analysis identification techniques”**, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 2001*, pp 359, 29-40.
- Ramírez-Centeno, M. Martín Del Campo, R. Calvillo, F. Suarez, O. Ramos, A. Lopez, G. Rivero, F. y Ruiz Sandoval, M., (1997) **“Mapa de curvas de isoperiodo de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco”**, *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Veracruz, Veracruz, México.
- Nakamura Y., (1989), **“A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micritremors on the ground surface”** *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)* pp. 30:1, 25-33.
- Parra L, y Sajda P., (2003), **“Blind source separation via generalized eigenvalue decomposition”**, *Journal of Machine Learning Research 4* pp. 1261-1296
- Parra L., (2007), **“Quikie blind source separation”**, Revisado en línea el 2011/10/04, <http://newton.bme.columbis.edu/~lparra/publish/quikieebss.html>
- Rivero-Angeles, F. J., Rodríguez-Rocha, R., y Gomez-Ramirez, E., (2009), **“Identificación de parámetros modales en edificios utilizando los métodos subsespacial y de descomposición en el dominio de la frecuencia”**, *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Puebla, Puebla, México.
- Rodríguez-Rocha R, Rivero-Angeles F.J, y Gomez-Ramírez E., (2008), **“Damage detection without baseline modal parameters utilizing the baseline stiffness method and independent component analysis for modal parameter extration”**, 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC 2008 Hersonissos, Crete, Greece
- Shih, C. Y. Tsuei, Y. G. Allemang, R. J. Brown D. L.,(1989) **“Complex Mode Indication Function and its Applications to Spatial Domian Parameter Estimation”**, *Structural Dynamics Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering*, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, U.S.A.
- Spitznogle, F.R., y Quazi, A. H., (1970), **“Representation and analysis of time-limited signals using a complex esponential algorithm”**, *J.Acoust. Soc. Am*, pp 47:1150-1155

Mallat, S., (1989), "**A theory for multiresolution signal descompositioin: The wavelet representation**", *IEEE Patter analysis and machine intelligence*, vol 11 no. 7 pp 674:693.

Vold, H., y Rocklin, G. T., (1982), "**The numerical implementation of a multi-imput modal estimation method for mini-computers.**", *1st. Int. Modal Analysis Conf. (IMAC I)*. pp 542-548, Orlando Florida.

The Math Works Inc., (2007), **Matlab**, Natick, Massachusetts, USA.

APÉNDICE A

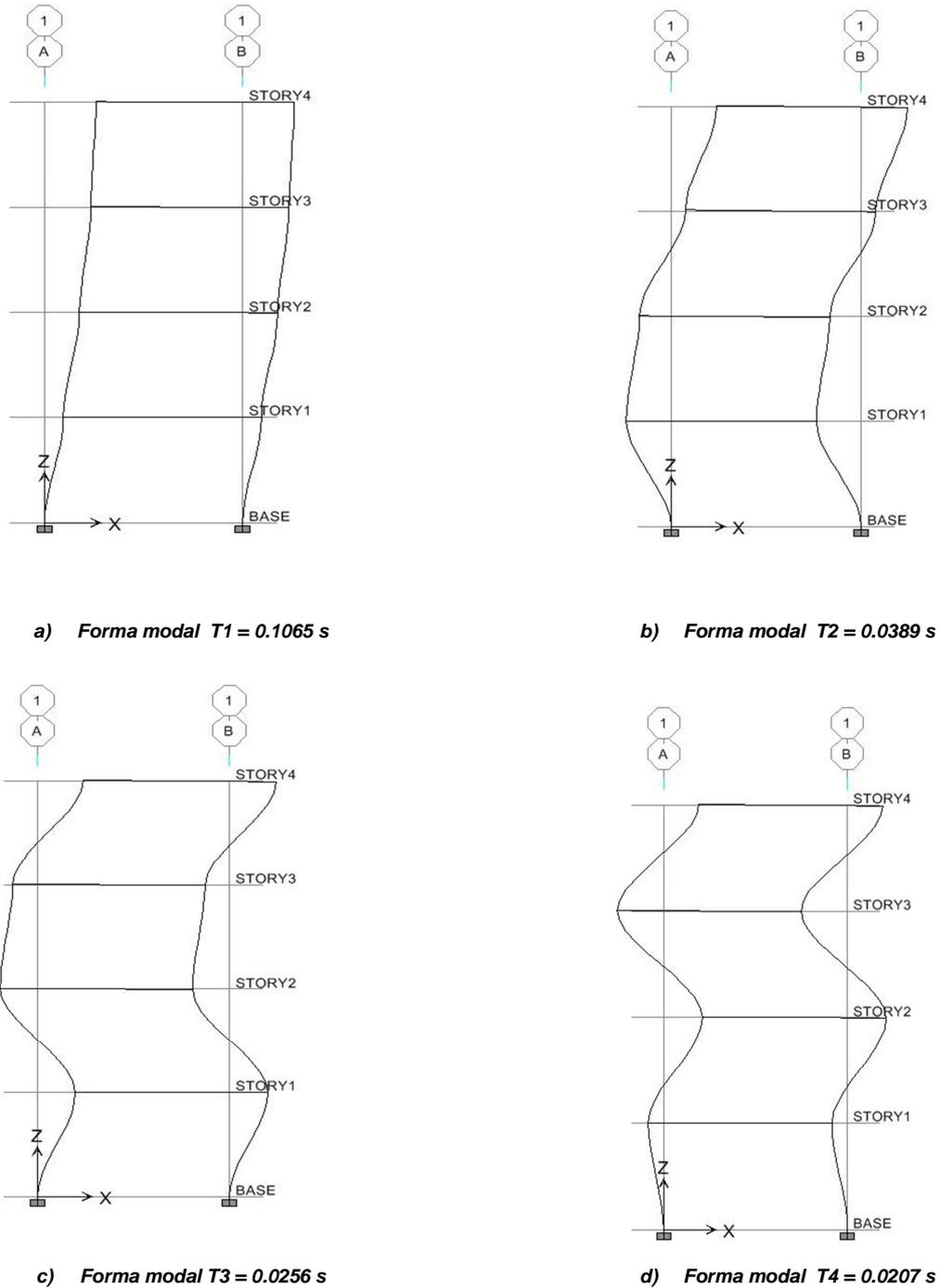


Figura A.1 Configuración de formas modales modelo bidimensional

$$f_{49} \rightarrow T = 0.10655s$$

$$[\hat{G}_{yy}(f_{49})] = \begin{bmatrix} 2.5791 & 2.3116-0.0008i & 1.7118-0.0038i & 0.8700-0.0138i & -0.1124-0.0162i \\ 2.3116-0.0008i & 2.0718 & 1.5342-0.0039i & 0.7797-0.0127i & -0.1008-0.0145i \\ 1.7118+0.0038i & 1.5342+0.0039i & 1.1361 & 0.5774-0.0079i & -0.0746-0.0109i \\ 0.8700+0.0138i & 0.7797+0.0127i & 0.5774+0.0079i & 0.2935 & -0.0378-0.0061i \\ -0.1124+0.0162i & -0.1008+0.0145i & -0.0746+0.0109i & -0.0378+0.0061i & 0.0050 \end{bmatrix} * 10^{10}$$

$$f_{130} \rightarrow T = 0.03875s$$

$$[\hat{G}_{yy}(f_{130})] = \begin{bmatrix} 3.6414 & 1.0600-0.0626i & -2.6437-0.2024i & -3.6049-0.2709i & 0.0388-0.0066i \\ 1.0600+0.0626i & 0.3069 & -0.7660-0.1044i & -1.0447-0.1408i & 0.0114-0.0013i \\ -2.6437+0.2024i & -0.7660+0.1044i & 1.9306 & 2.6322-0.0037i & -0.0278+0.0070i \\ -3.6049+0.2709i & -1.0447+0.1408i & 2.6322+0.0037i & 3.5888 & -0.0379+0.0094i \\ 0.0388+0.0066i & 0.0114+0.0013i & -0.0278-0.0070i & -0.0379-0.0094i & 0.0004 \end{bmatrix} * 10^8$$

$$f_{197} \rightarrow T = 0.02566s$$

$$[\hat{G}_{yy}(f_{197})] = \begin{bmatrix} 1.4067 & -0.7675+0.0135i & -1.1471+0.0012i & 1.1644-0.0117i & -0.0071+0.0322i \\ -0.7675-0.0135i & 0.4189 & 0.6259+0.0104i & -0.6354-0.0048i & 0.0042-0.0175i \\ -1.1471-0.0012i & 0.6259-0.0104i & 0.9354 & -0.9495+0.0085i & 0.0058-0.0263i \\ 1.1644+0.0117i & -0.6354+0.0048i & -0.9495-0.0085i & 0.9639 & -0.0062+0.0266i \\ -0.0071-0.0322i & 0.0042+0.0175i & 0.0058+0.0263i & -0.0062-0.0266i & 0.0008 \end{bmatrix} * 10^9$$

$$f_{243} \rightarrow T = 0.02061s$$

$$[\hat{G}_{yy}(f_{243})] = \begin{bmatrix} 1.0098 & -1.0452+0.1133i & 1.0269+0.1063i & -0.2856+0.0006i & -0.0196-0.0849i \\ -1.0452-0.1133i & 1.0945 & -1.0509-0.2253i & 0.2957+0.0314i & 0.0108+0.0901i \\ 1.0269-0.1063i & -1.0509+0.2253i & 1.0555 & -0.2904+0.0307i & -0.0289-0.0843i \\ -0.2856-0.0006i & 0.2957-0.0314i & -0.2904-0.0307i & 0.0808 & 0.0055+0.0240i \\ -0.0196+0.0849i & 0.0108-0.0901i & -0.0289+0.0843i & 0.0055-0.0240i & 0.0075 \end{bmatrix} * 10^7$$

Figura A.2 Matrices espectrales de potencia de los picos localizados con en la gráfica de variación de valores singulares

$$[S_p] = \begin{bmatrix} 3.88 \times 10^0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.90 \times 10^6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.79 \times 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.89 \times 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.45 \times 10^9 \end{bmatrix} \quad [S_{30}] = \begin{bmatrix} 9.47 \times 10^8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.27 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.91 \times 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9.91 \times 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.82 \times 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$[S_{97}] = \begin{bmatrix} 3.72 \times 10^9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.79 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.58 \times 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.68 \times 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.37 \times 10^{10} \end{bmatrix} \quad [S_{26}] = \begin{bmatrix} 4.54 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.83 \times 10^9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.68 \times 10^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.13 \times 10^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.47 \times 10^{12} \end{bmatrix}$$

Figura A.3 Matrices S_p de los registros de aceleración del marco bidimensional

$$[U_{49}] = \begin{bmatrix} -0.651 & 0.461 & 0.481 & 0.348 & 0 \\ -0.583 & 0.194 & -0.565 & -0.537 & 0 \\ -0.432 & -0.817 & 0.324 & -0.172 & 0 \\ -0.219 & -0.276 & -0.568 & 0.714 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [U_{130}] = \begin{bmatrix} -0.620 & -0.627 & 0.344 & 0.322 & 0 \\ -0.180 & 0.468 & 0.774 & -0.262 & 0 \\ 0.450 & 0.148 & 0.326 & 0.806 & 0 \\ 0.613 & -0.600 & 0.340 & -0.006 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[U_{197}] = \begin{bmatrix} -0.614 & 0.273 & -0.311 & 0.658 & 0 \\ 0.335 & 0.542 & -0.711 & -0.245 & 0 \\ 0.501 & -0.574 & -0.385 & 0.500 & 0 \\ -0.508 & -0.540 & -0.012 & -0.458 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [U_{243}] = \begin{bmatrix} -0.557 & 0.709 & -0.416 & -0.090 & 0 \\ 0.577 & -0.021 & -0.783 & -0.151 & 0 \\ -0.567 & -0.658 & -0.407 & 0.187 & 0 \\ 0.157 & 0.236 & 0.015 & 0.810 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura A.4 Matrices U_p de los registros de aceleración del marco bidimensional

$$[U_{49}](:,1) = \begin{pmatrix} -0.6510 \\ -0.5835 \\ -0.4321 \\ -0.2196 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.8963 \\ 0.6637 \\ 0.3373 \end{pmatrix}$$

$$[U_{130}](:,1) = \begin{pmatrix} -0.6201 \\ -0.1805 \\ 0.4502 \\ 0.6138 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.2911 \\ -0.7260 \\ -0.9900 \end{pmatrix}$$

$$[U_{197}](:,1) = \begin{pmatrix} -0.6145 \\ 0.3352 \\ 0.5011 \\ -0.5086 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0000 \\ -0.5456 \\ -0.8154 \\ 0.8277 \end{pmatrix}$$

$$[U_{243}](:,1) = \begin{pmatrix} -0.5576 \\ 0.5771 \\ -0.5670 \\ 0.1577 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0000 \\ -1.0350 \\ 1.0169 \\ -0.2829 \end{pmatrix}$$

Figura A .5 Normalización de vectores $U_p(:,1)$ de los registros de aceleración del marco bidimensional

Tabla A.1 Criterios de comparación modal, con base en los datos generados por el AEC en el modelo bidimensional

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	100.00	99.93	99.95	NI
CCMC	100.00	99.93	99.95	NI
DMN	0.00	2.65	2.24	NI

NI: No identificado.

Tabla A.2 Criterios de comparación modal, con base en los datos generados por el DDF en el modelo bidimensional

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	99.96	99.93	99.97	98.53
CCMC	99.96	99.93	99.97	98.53
DMN	2.00	2.65	1.73	12.21

Tabla A.3 Criterios de comparación modal, con base en los datos generados por el ACI en el modelo bidimensional

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	100.00	99.92	99.97	99.92
CCMC	100.00	99.92	99.97	99.92
DMN	0.00	2.83	1.73	2.83

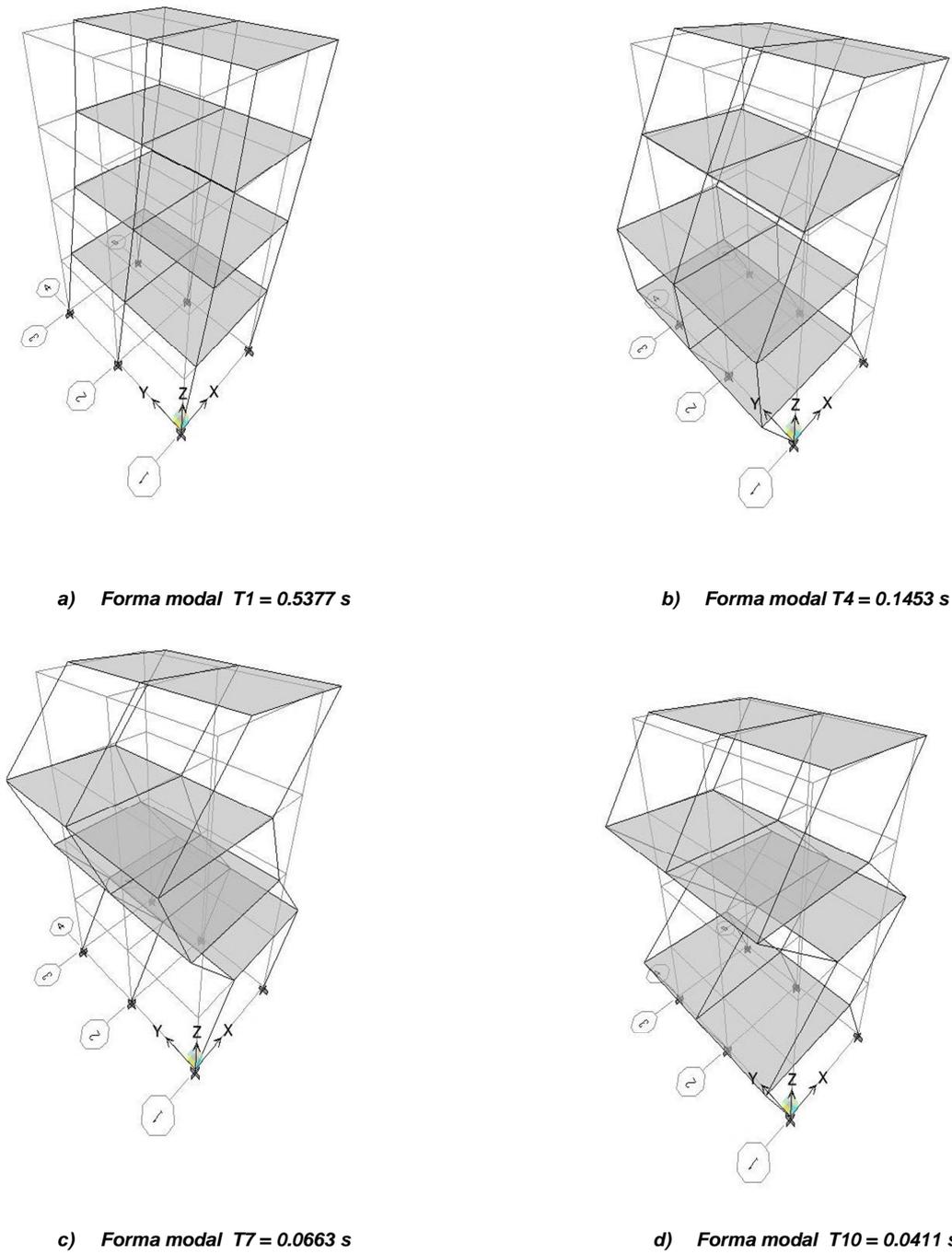
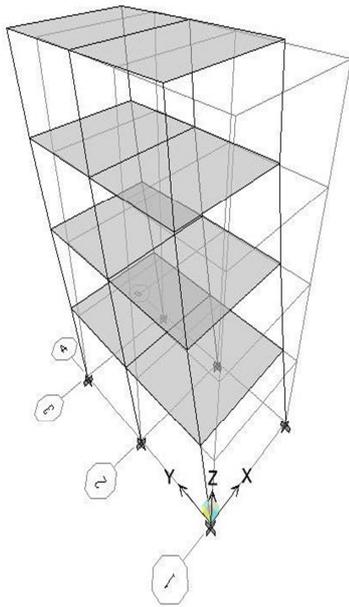
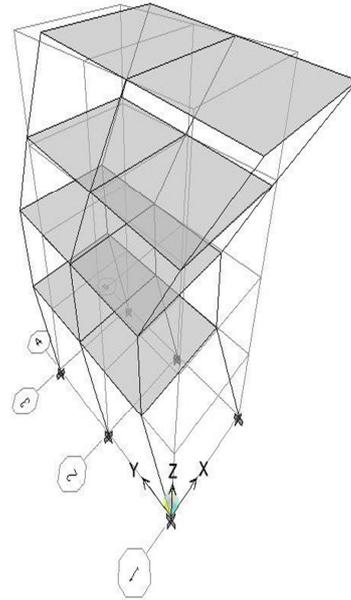


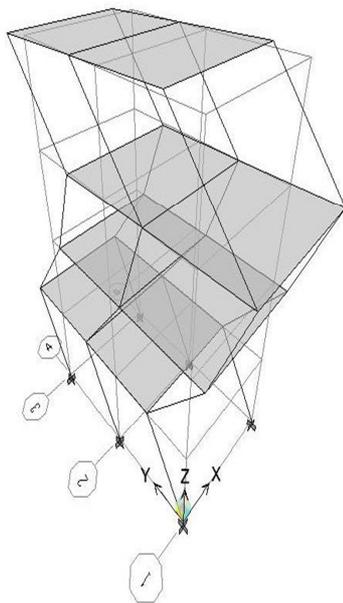
Figura A.6 Configuración de formas modales modelo tridimensional eje X vista en isométrico



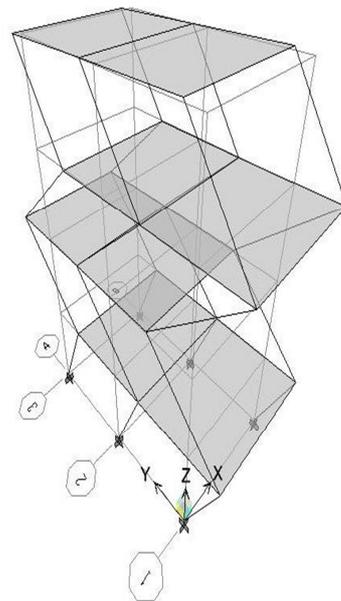
a) Forma modal $T_2 = 0.4606$ s



b) Forma modal $T_5 = 0.1311$ s

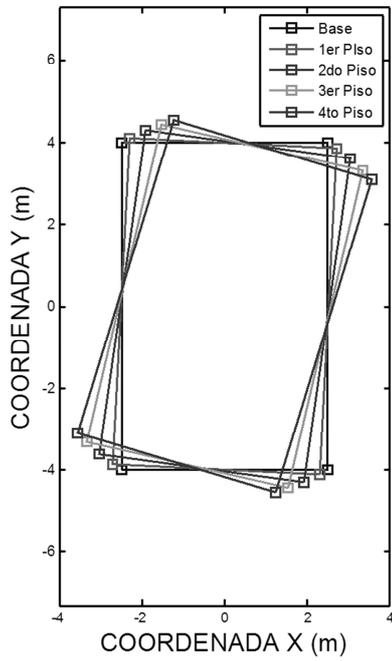


c) Forma modal $T_8 = 0.0635$ s

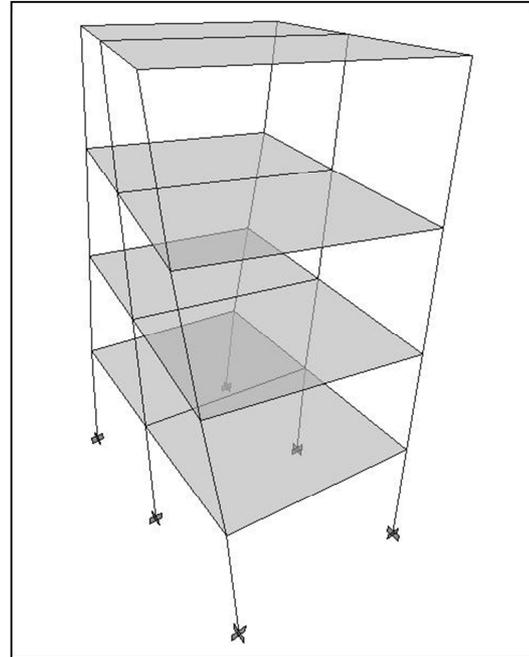


d) Forma modal $T_{11} = 0.0407$ s

Figura A.7 Configuración de formas modales modelo tridimensional eje Y vista en isométrico

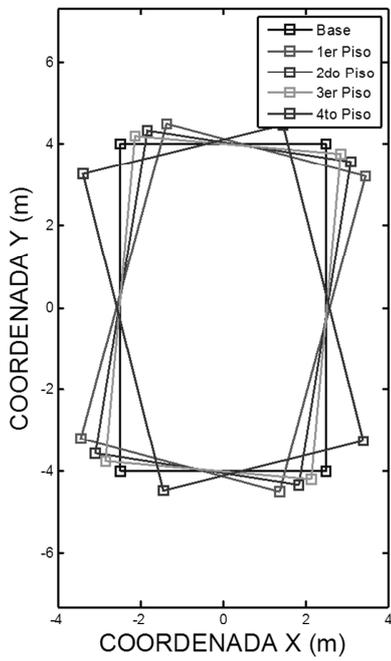


a) Vista en planta

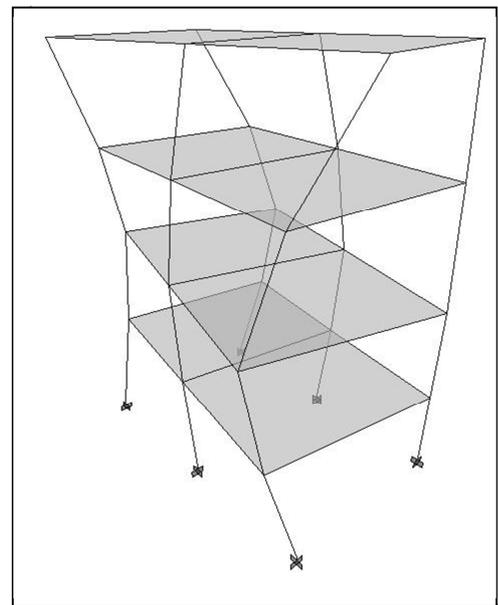


b) Vista en isométrico

Figura A.8 Configuración de la 3er forma modal $T_3= 0.4274$ s del modelo tridimensional



a) Vista en planta



b) Vista en isométrico

Figura A.9 Configuración de la 6ta forma modal $T_6= 0.1225$ s del modelo tridimensional

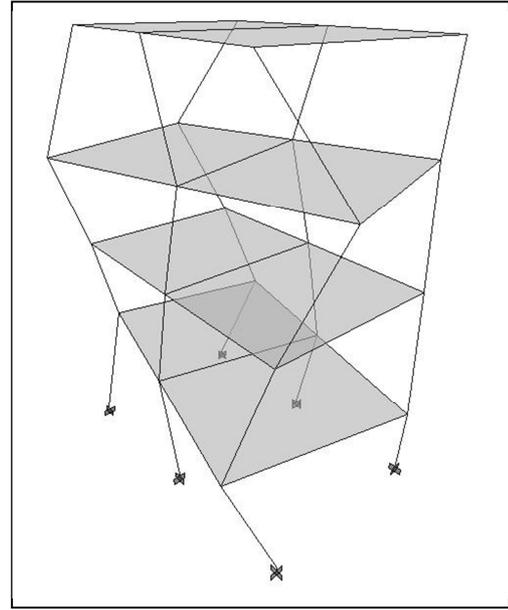
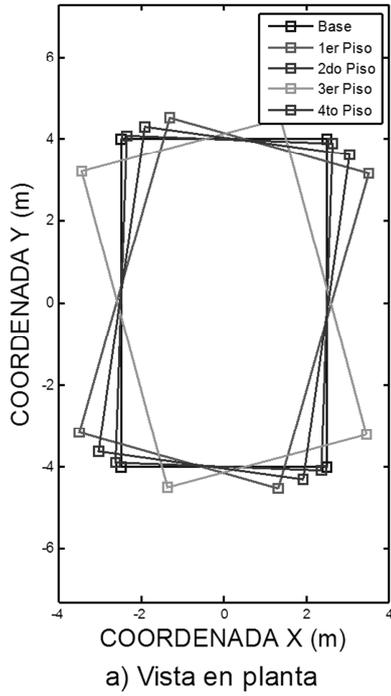


Figura A.10 Configuración de la 9na forma modal $T_9= 0.0585$ s del modelo tridimensional

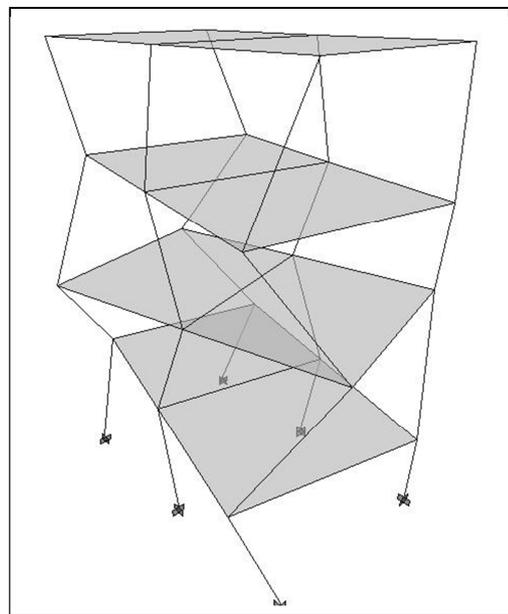
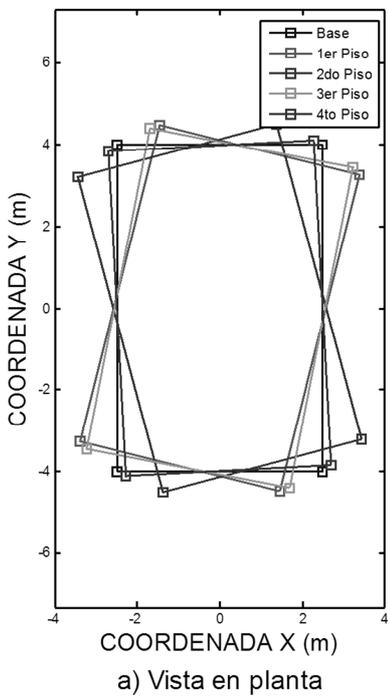


Figura A.11 Configuración de la 12va forma modal $T_{12}= 0.0370$ s del modelo tridimensional

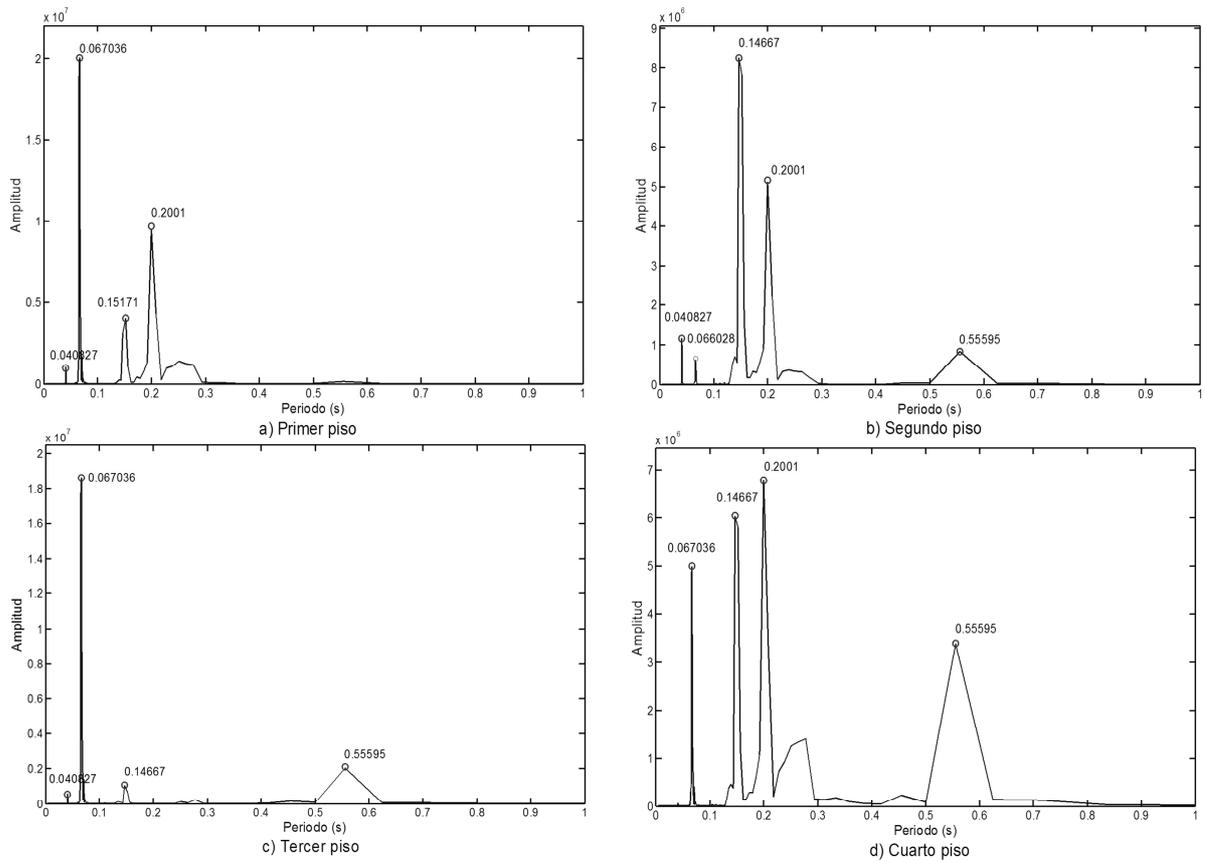


Figura A.12 Autoespectros de potencia de los registros generados en dirección X del modelo tridimensional

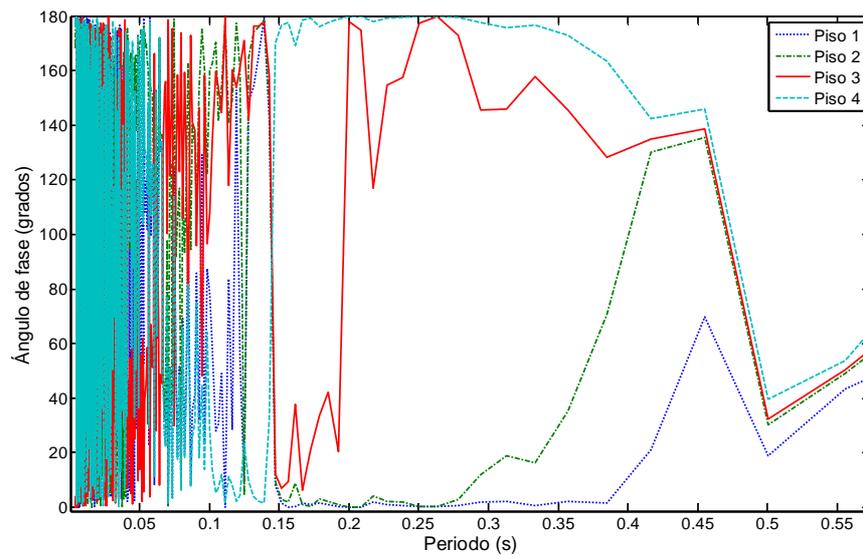


Figura A.13 Ángulo de fase del espectro cruzado del terreno y pisos en dirección X del modelo tridimensional

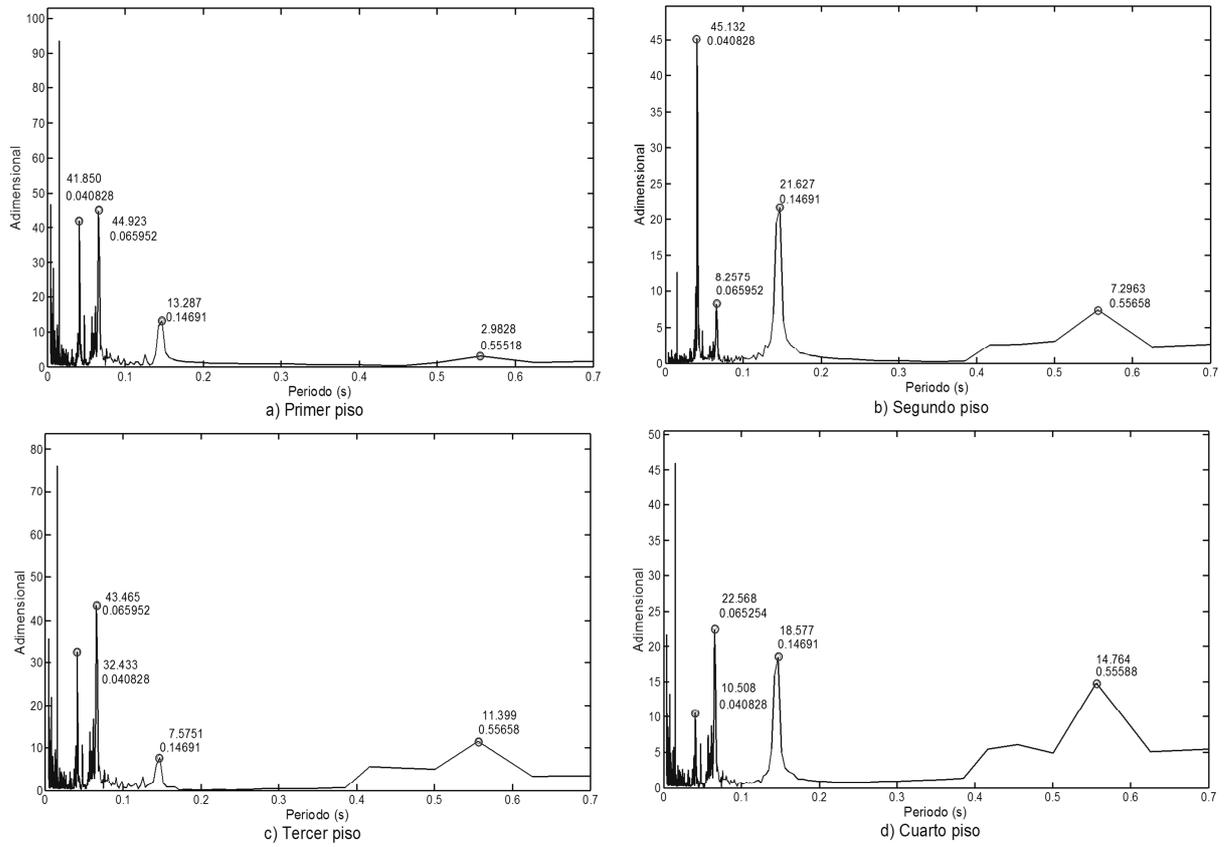


Figura A.14 Función de transferencia del espectro cruzado entre terreno y pisos, dirección X

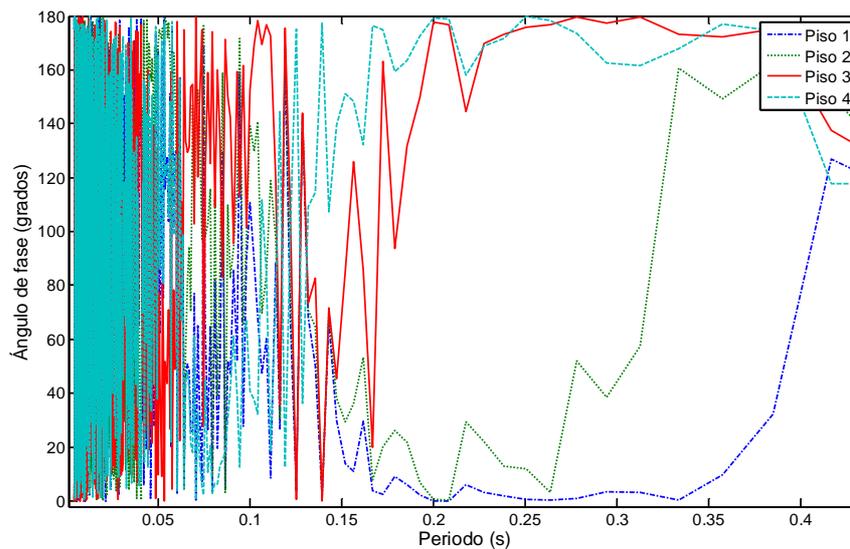


Figura A.15 Ángulo de fase del espectro cruzado del terreno y pisos en dirección Y del modelo tridimensional

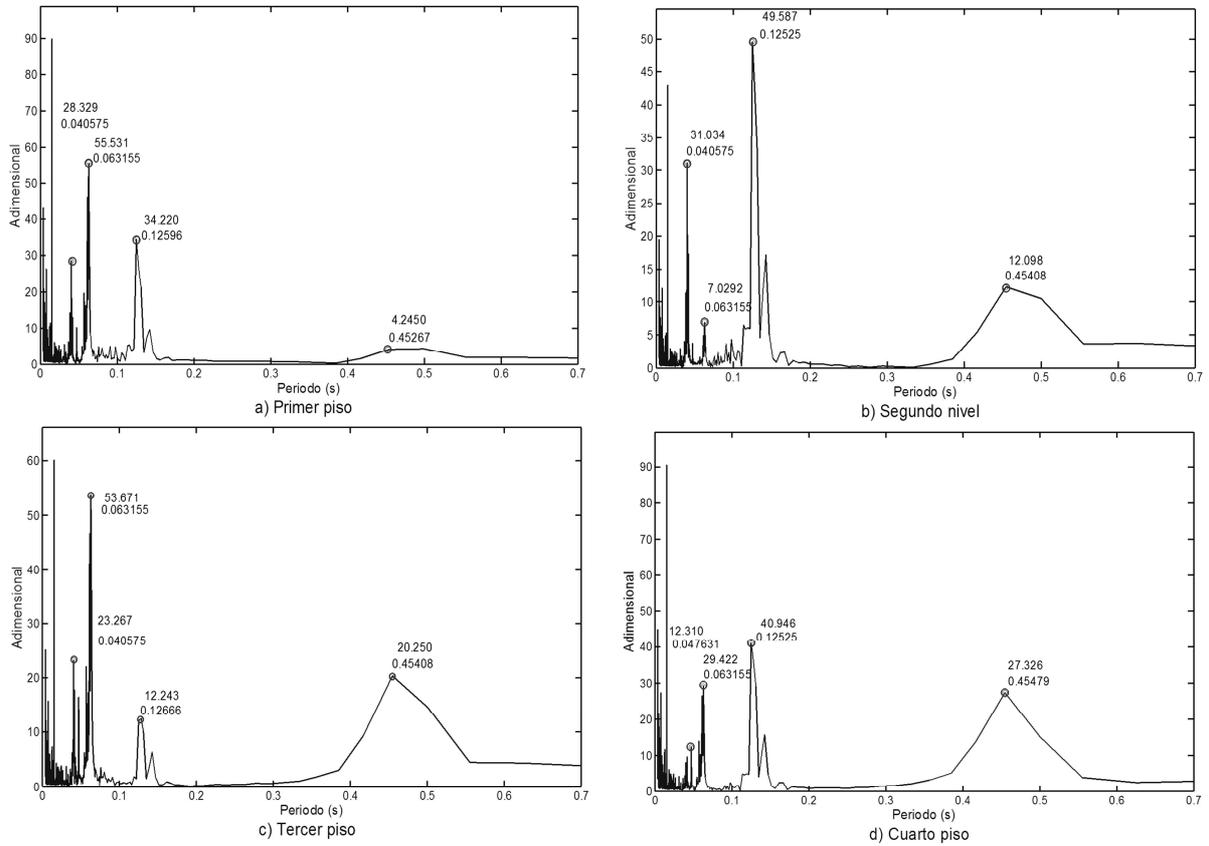


Figura A.16 Función de transferencia del espectro cruzado entre terreno y pisos, dirección Y

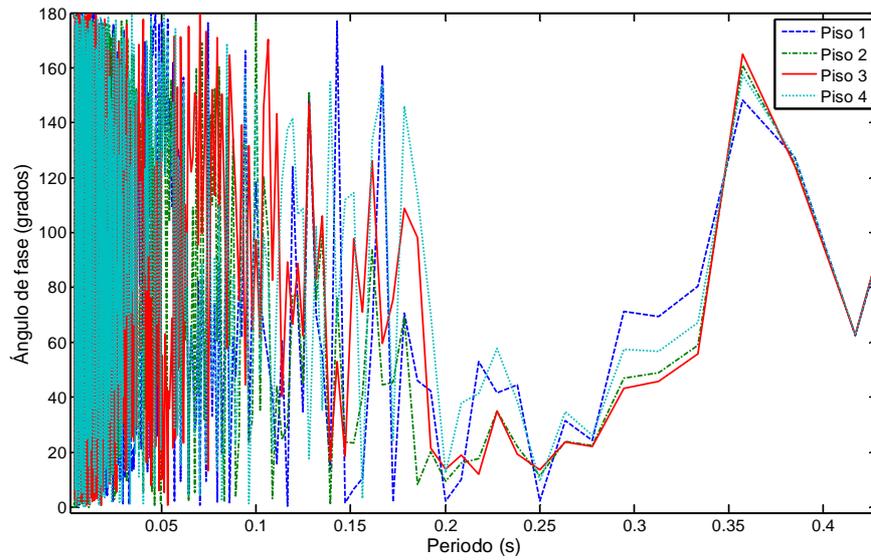


Figura A.17 Ángulo de fase del espectro cruzado del terreno y pisos torsional del modelo tridimensional

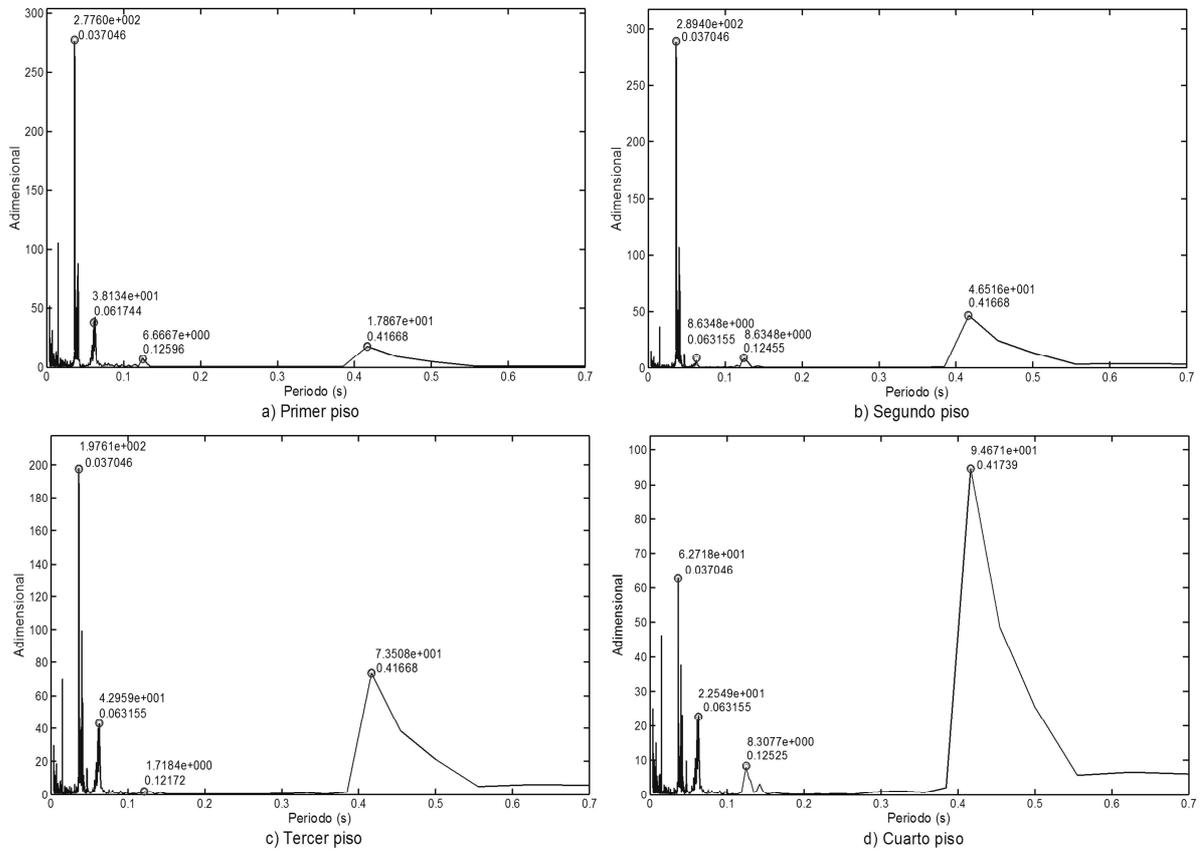


Figura A.18 Función de transferencia del espectro cruzado entre terreno y pisos, torsión

Tabla A.4 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección X, método AEC

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	99.90	99.98	100.00	99.92
CCMC	99.90	99.98	100.00	99.92
DMN	3.16	1.41	0.00	2.83

Tabla A.5 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección X, método DDF

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	99.94	99.31	99.99	99.92
CCMC	99.94	99.31	99.99	99.92
DMN	2.45	8.34	1.00	2.83

Tabla A.6 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección X, método ACI

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	100.00	100.00	100.00	100.00
CCMC	99.97	99.99	99.88	99.99
DMN	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla A.7 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección Y, método AEC

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	99.75	99.54	100.00	98.83
CCMC	99.75	99.55	100.00	98.83
DMN	5.01	6.80	0.00	10.88

Tabla A.8 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección Y, método DDF

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	99.78	100.00	100.00	99.80
CCMC	99.77	100.00	100.00	99.80
DMN	4.70	0.00	0.00	4.48

Tabla A.9 Criterios de comparación modal modelo 3D dirección Y, método ACI

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	99.98	99.95	100.00	99.97
CCMC	99.98	99.95	100.00	99.97
DMN	1.41	2.24	0.00	1.73

Tabla A.10 Criterios de comparación modal modelo 3D torsión, método AEC

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCMC	99.98	98.40	99.37	99.92
CCMC	99.98	98.40	99.37	99.99
DMN	1.41	12.75	7.96	2.83

Tabla A.11 Criterios de comparación modal modelo 3D torsión, método DDF

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	100.00	99.18	99.97	99.99
CCMC	100.00	99.18	99.97	99.99
DMN	0.00	9.09	1.73	1.00

Tabla A.12 Criterios de comparación modal modelo 3D torsión, método ACI

CRITERIOS DE COMPARACIÓN MODAL (%)				
MODO	1	2	3	4
CCM	99.95	99.85	99.97	99.99
CCMC	100.00	99.83	99.99	100.00
DMN	2.24	3.88	1.73	1.00

APENDICE B

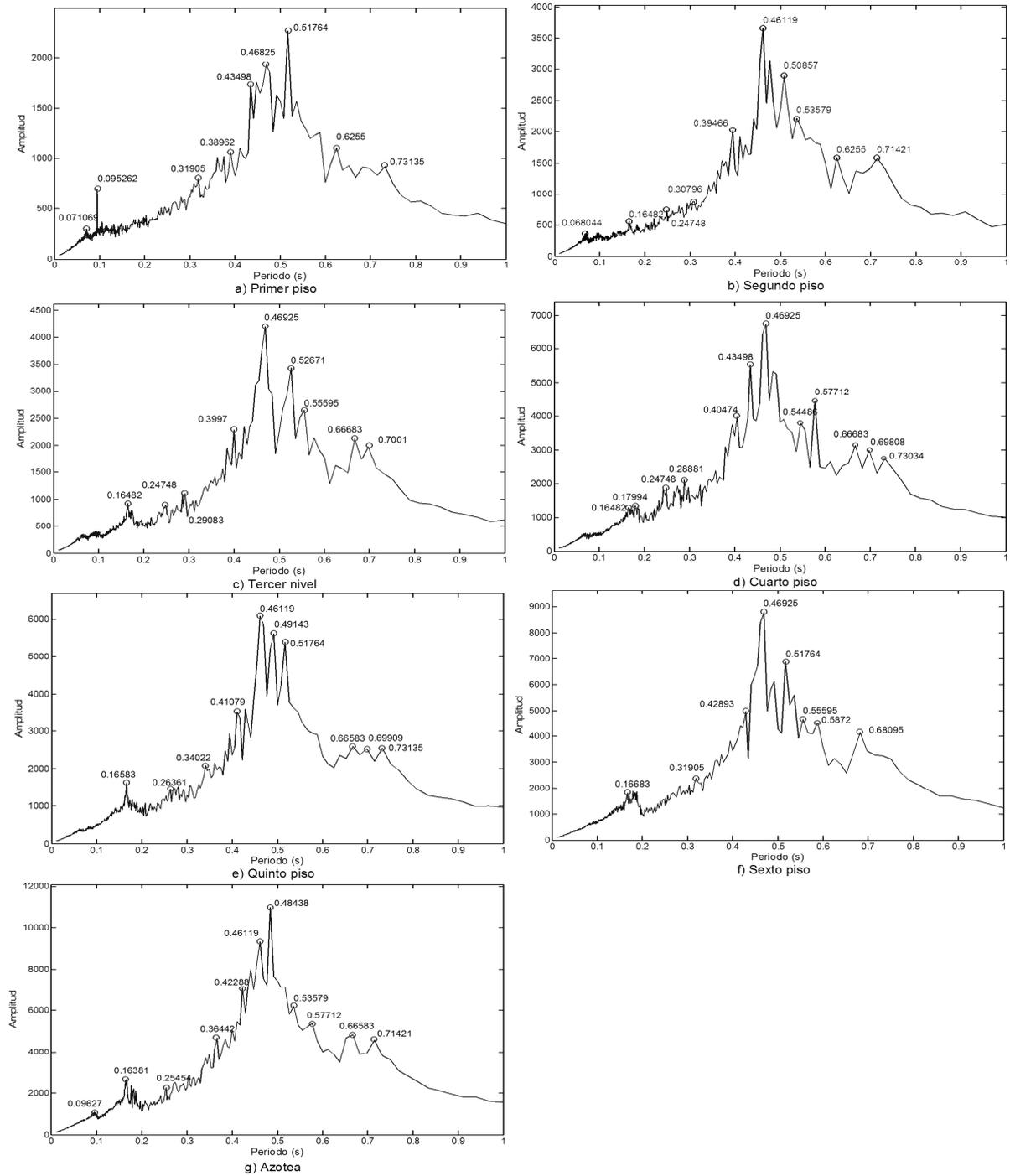


Figura B.1 Espectros de Fourier de registros en dirección X edificio de concreto

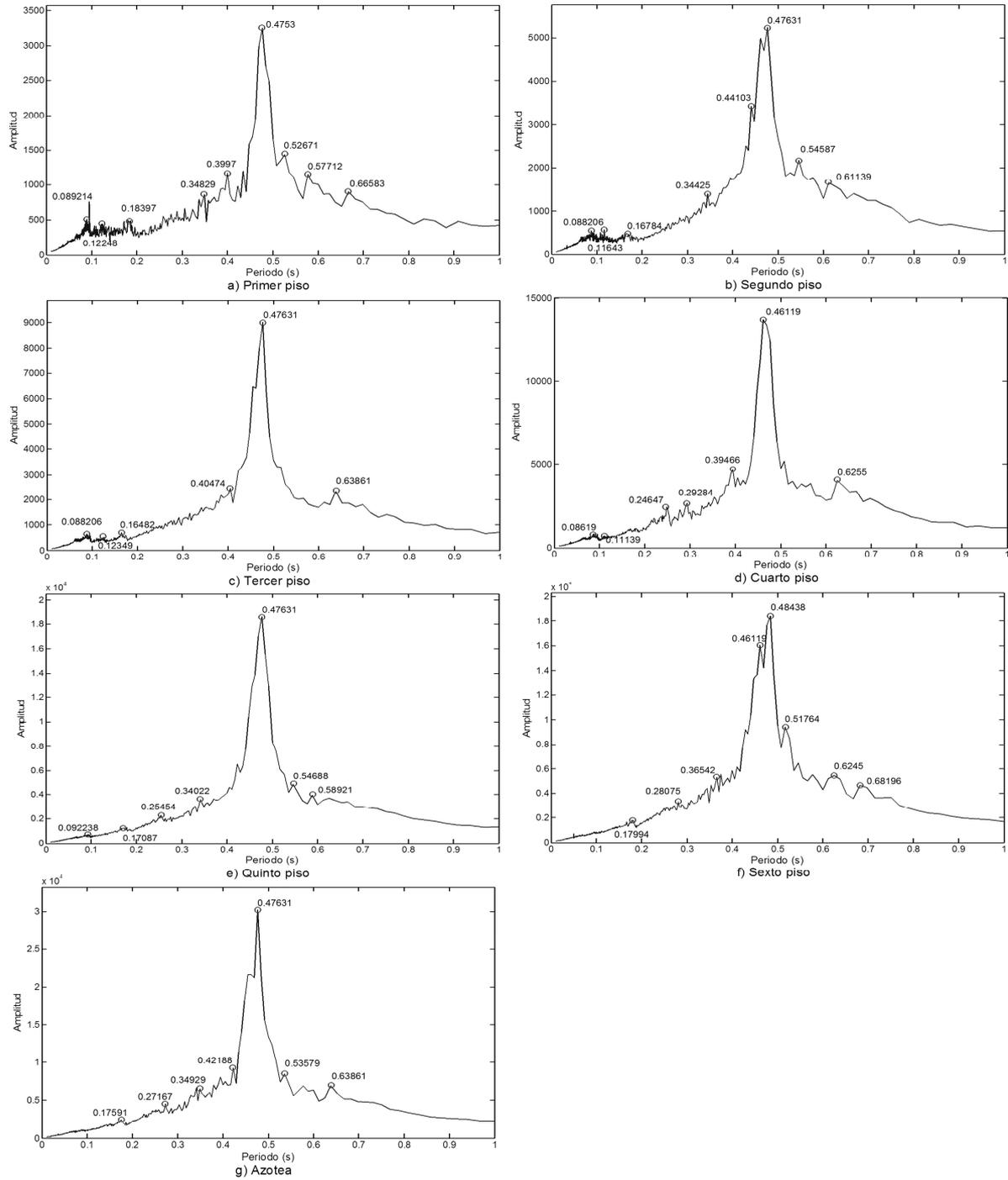


Figura B.2 Espectros de Fourier de registros en dirección Y edificio de concreto

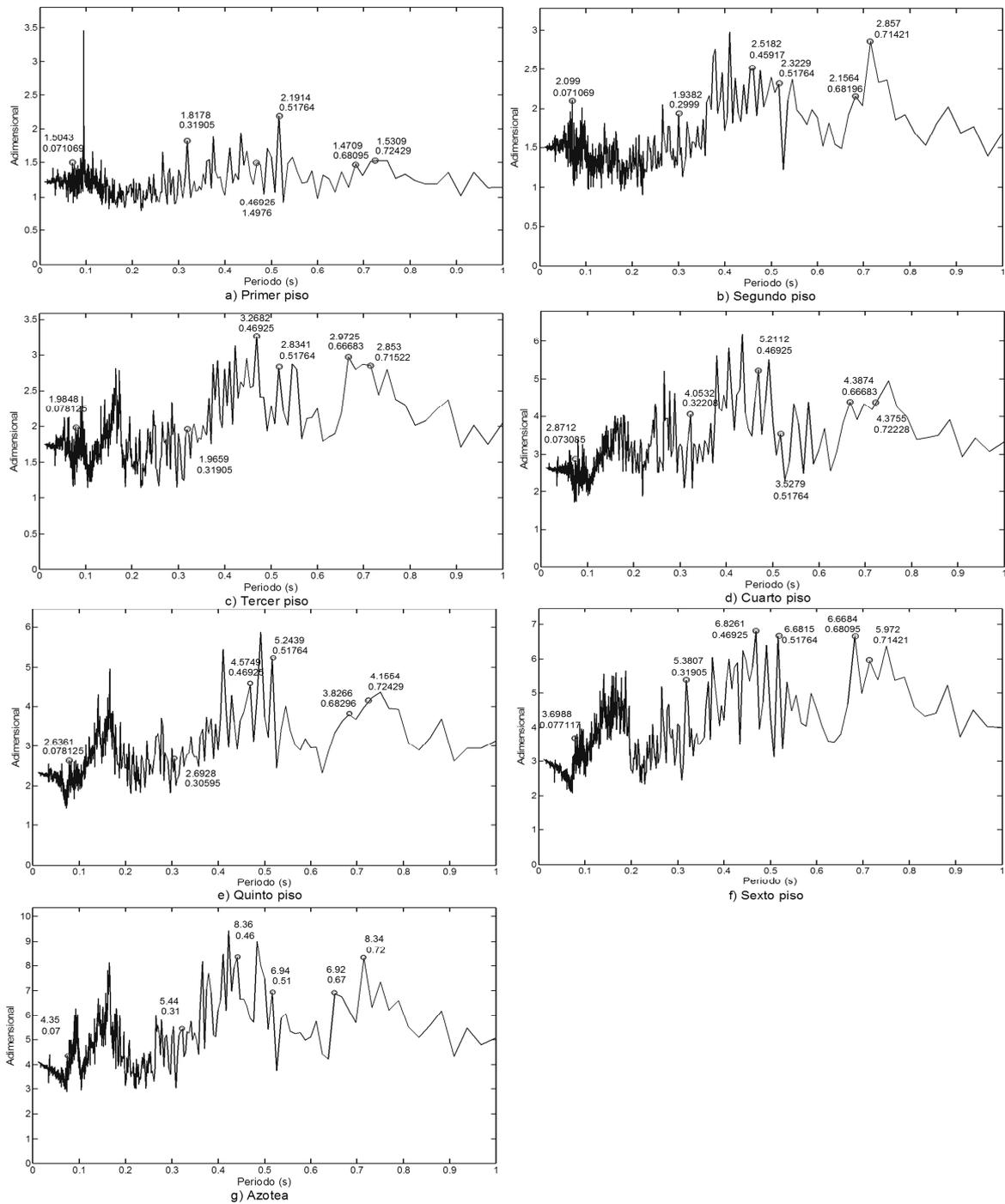


Figura B.3 Función de transferencia del espectro cruzado del terreno con pisos dirección X

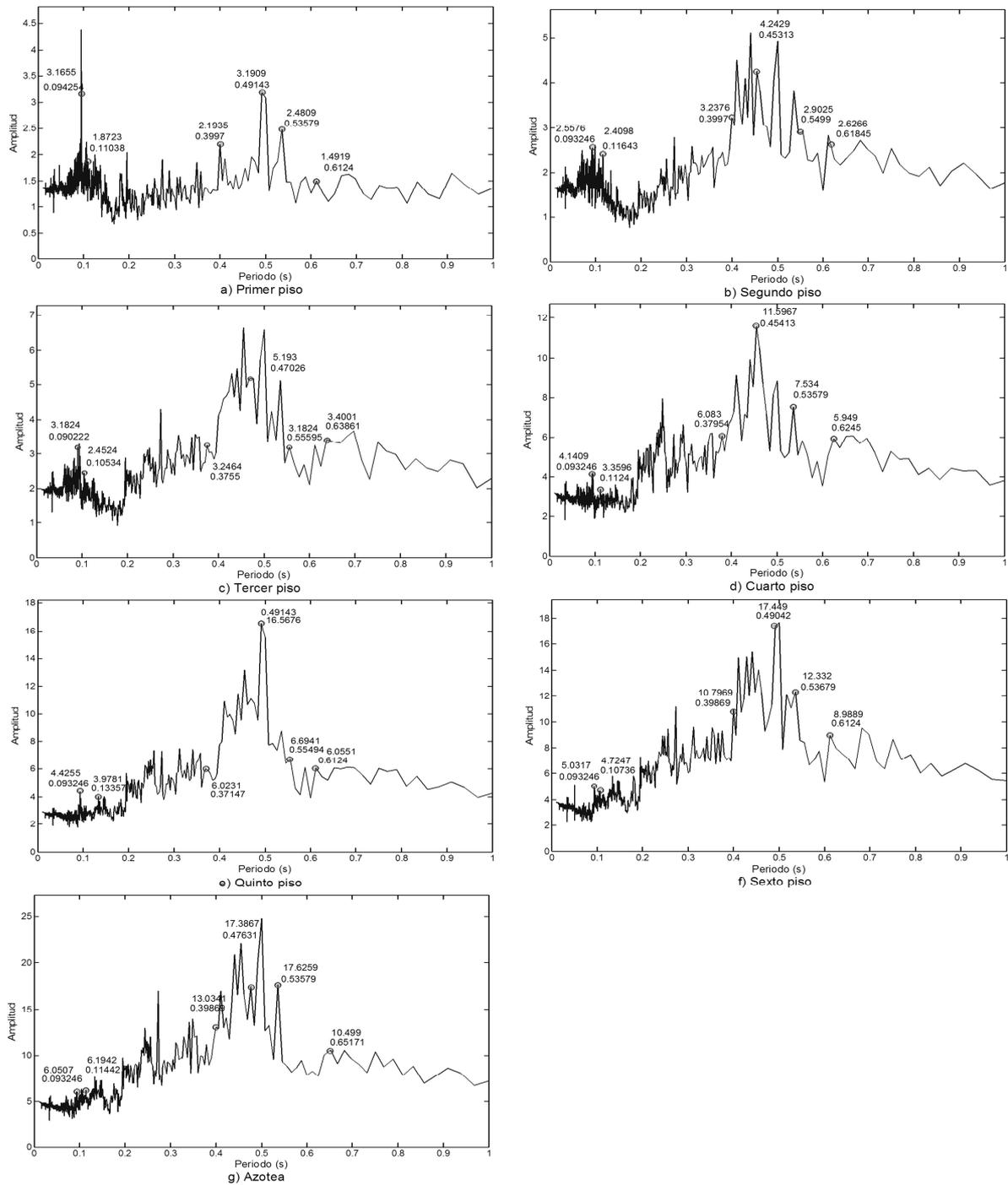


Figura B.4 Función de transferencia del espectro cruzado del terreno con pisos dirección Y

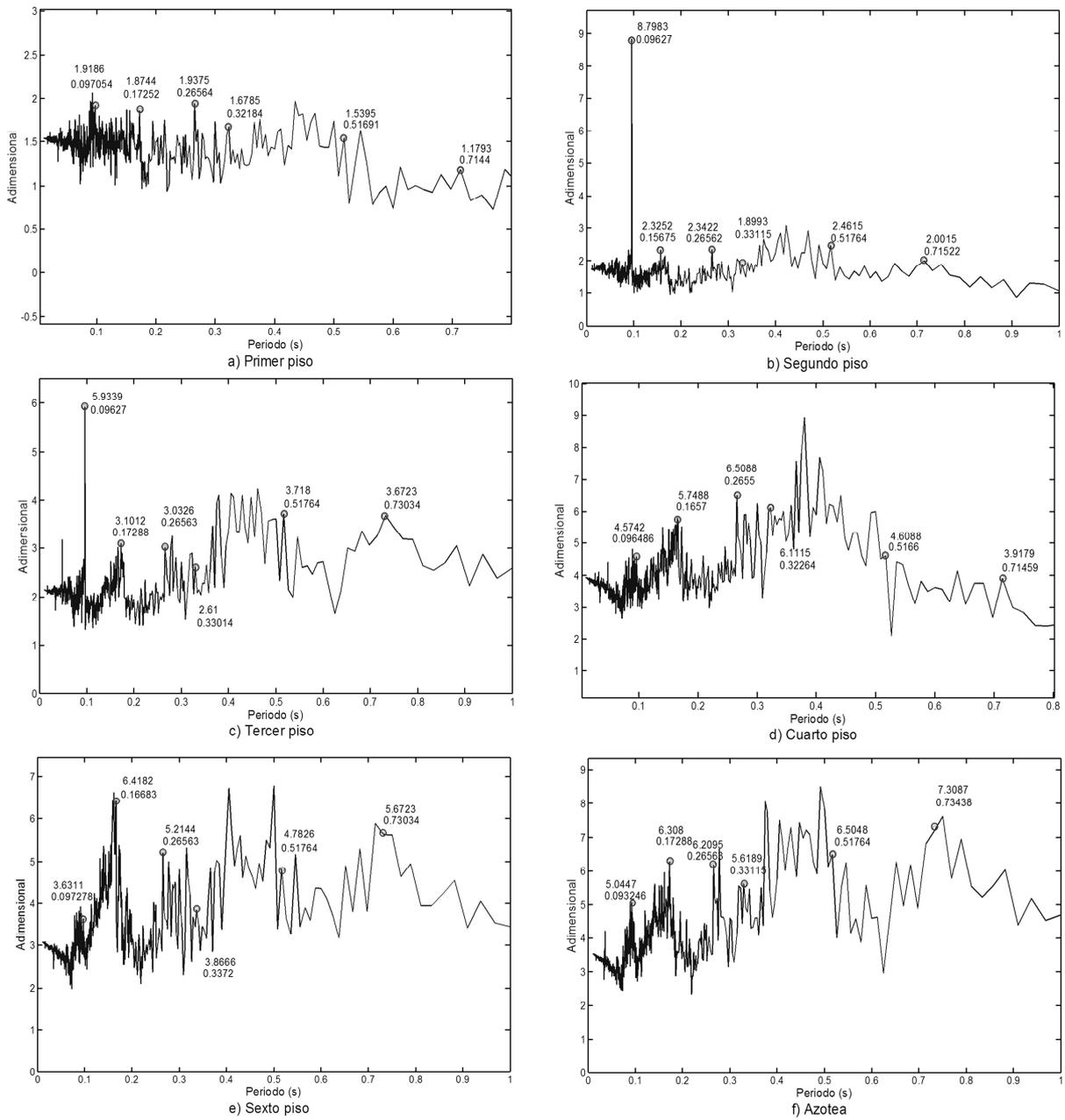


Figura B.5 Función de transferencia del espectro cruzado del terreno con pisos torsión

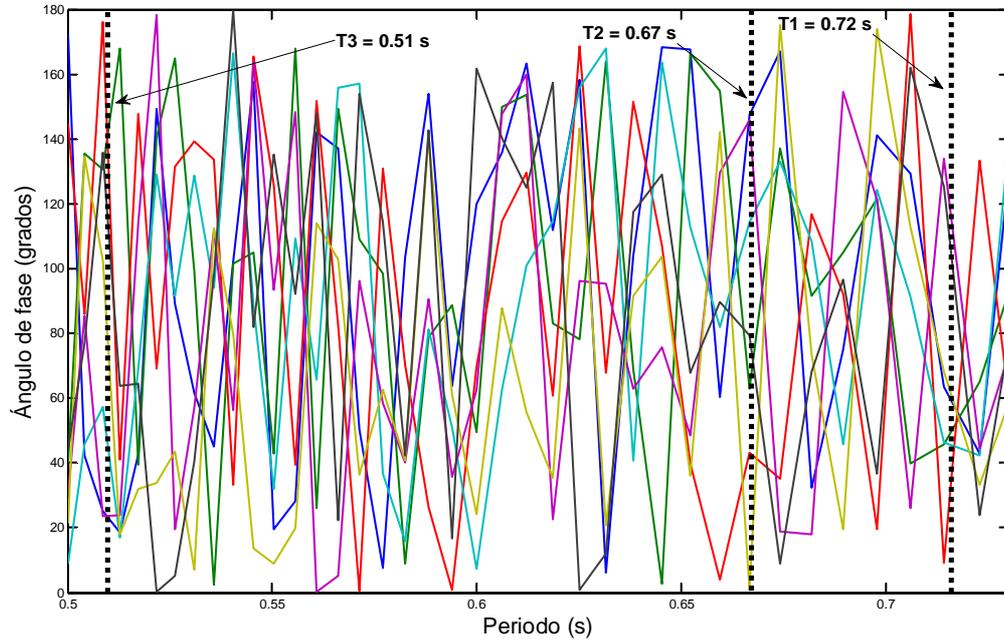


Figura B.6 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Dirección X $0.50 \text{ s} < T < 0.73 \text{ s}$

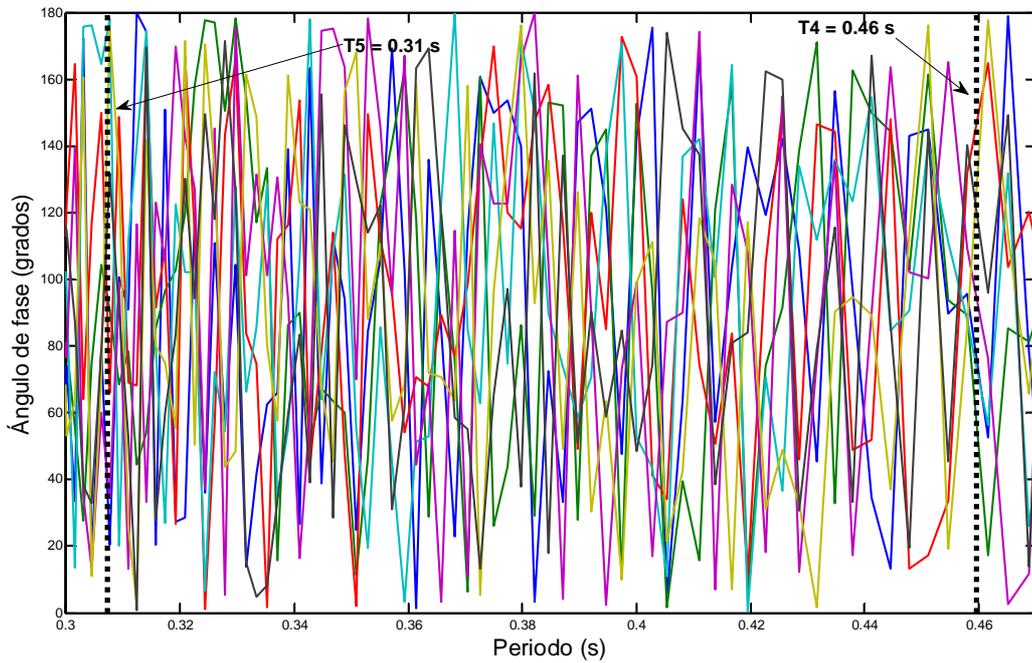


Figura B.7 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Dirección X $0.30 \text{ s} < T < 0.47 \text{ s}$

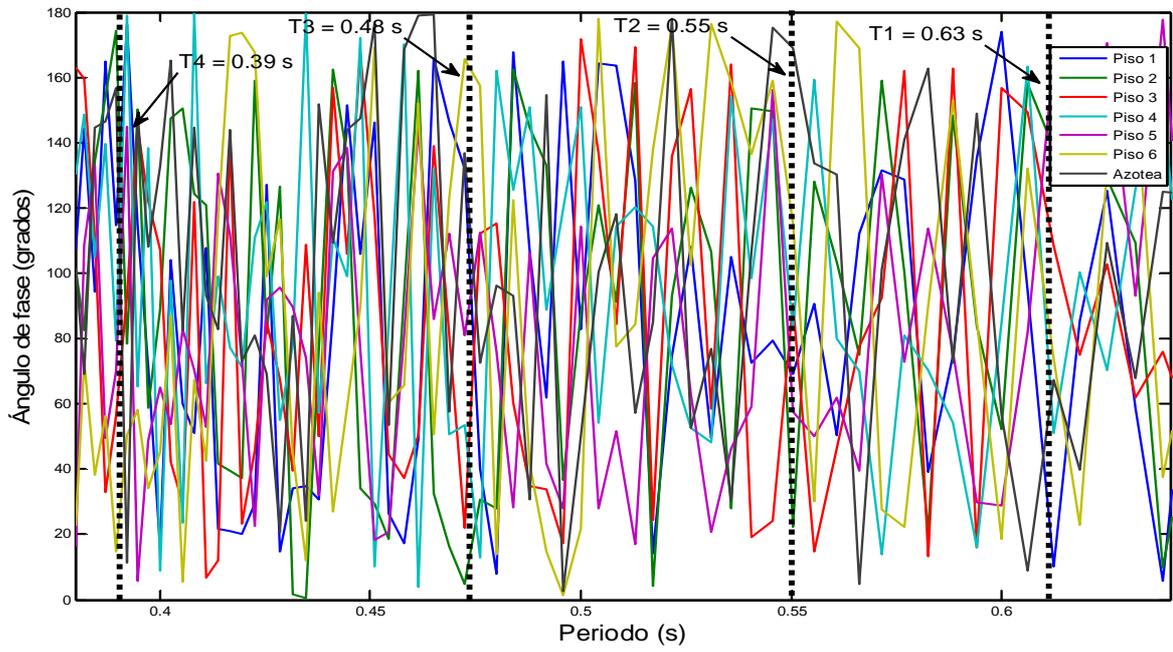


Figura B.8 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Dirección Y $0.38 \text{ s} < T < 0.64 \text{ s}$

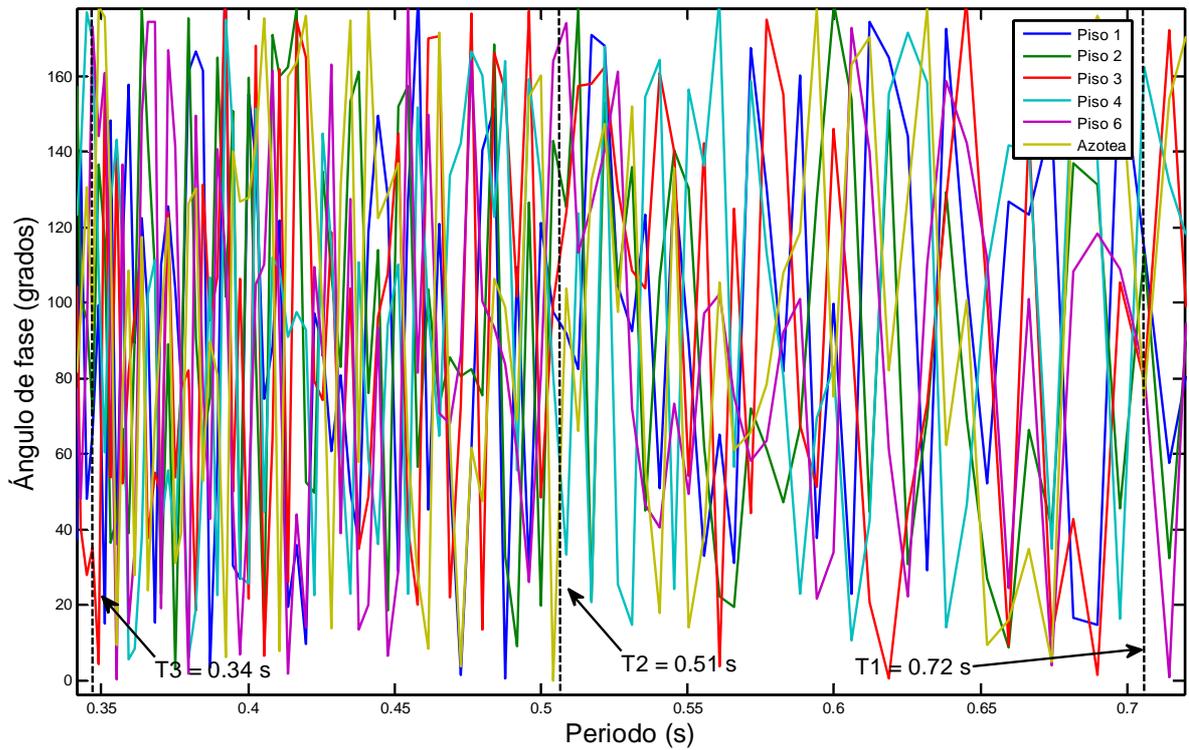


Figura B.9 Ángulo de fase del espectro cruzado entre PB y pisos. Torsión $0.34 \text{ s} < T < 0.73 \text{ s}$

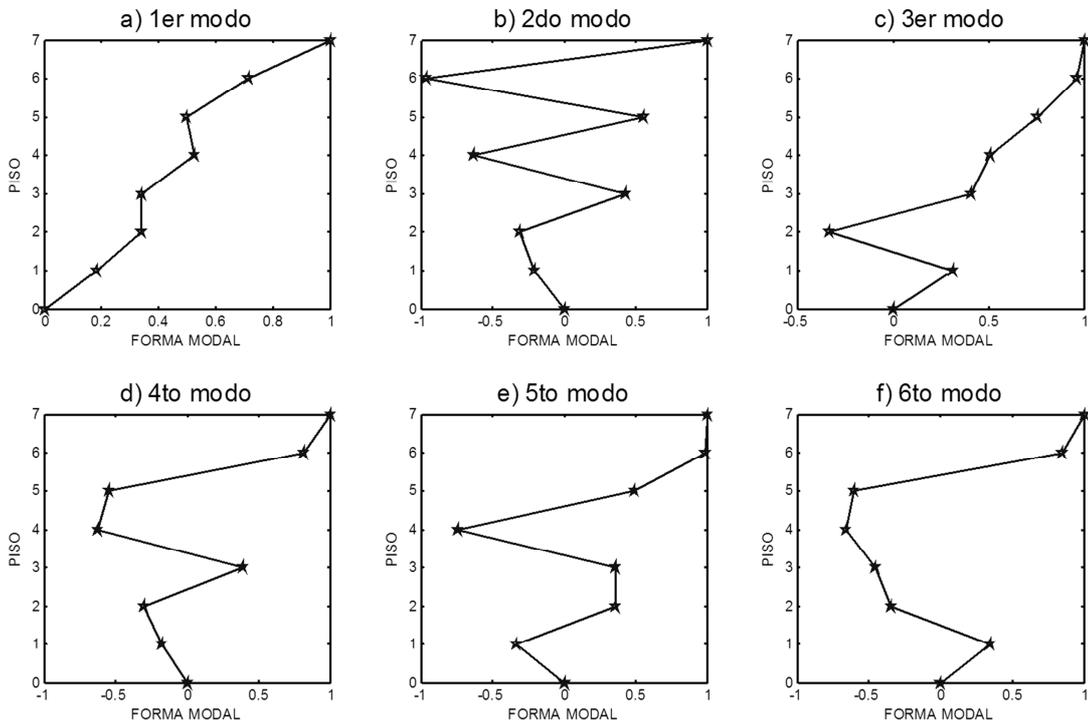


Figura B.10 Configuración formas modales dirección X, obtenidas por AEC

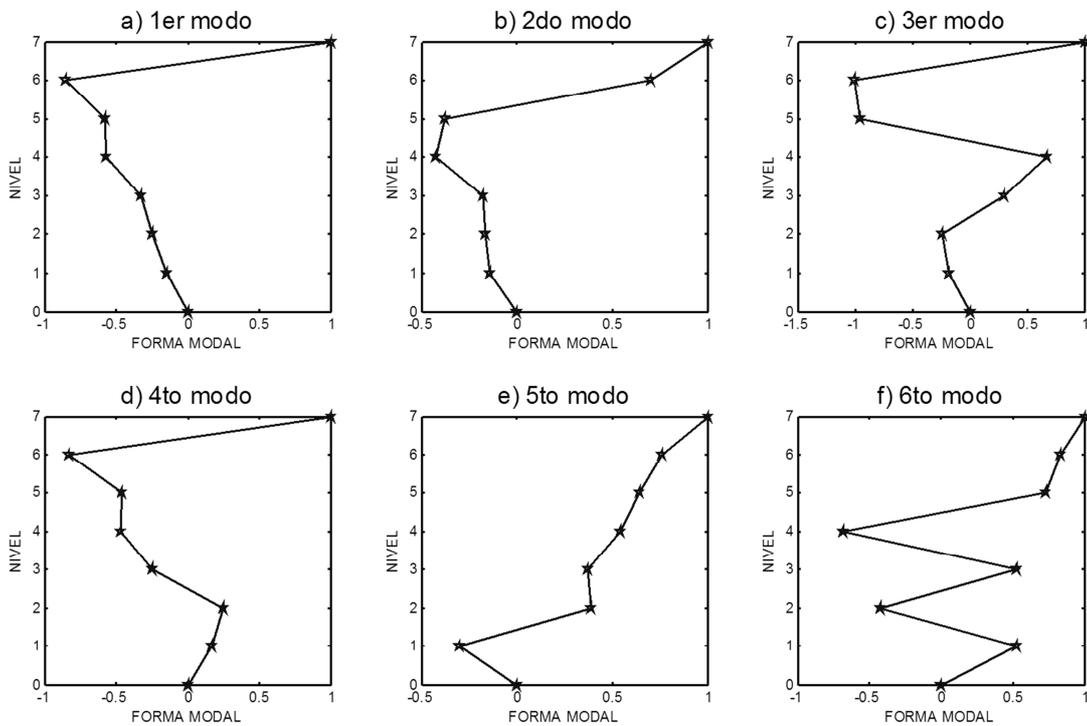


Figura B.11 Configuración formas modales dirección Y, obtenidas por AEC

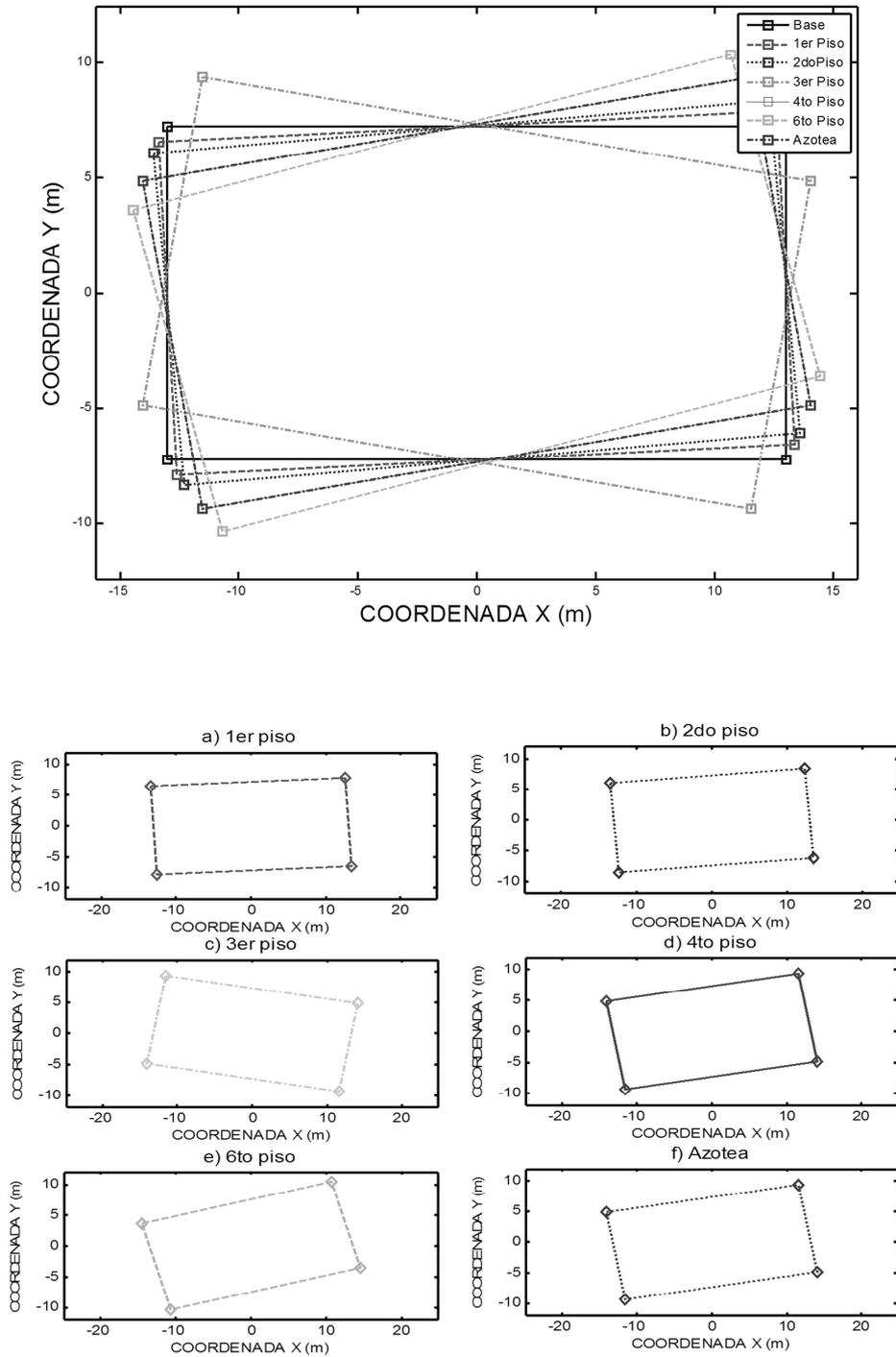


Figura B.12 Configuración 1er forma modal de torsión, obtenida por AEC

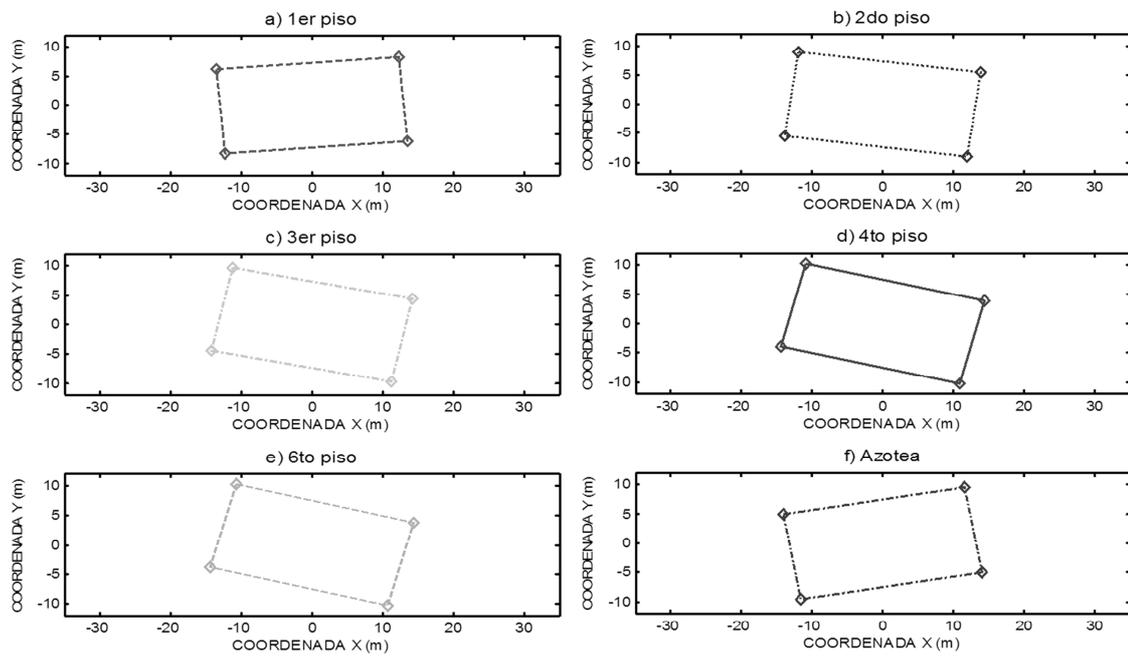
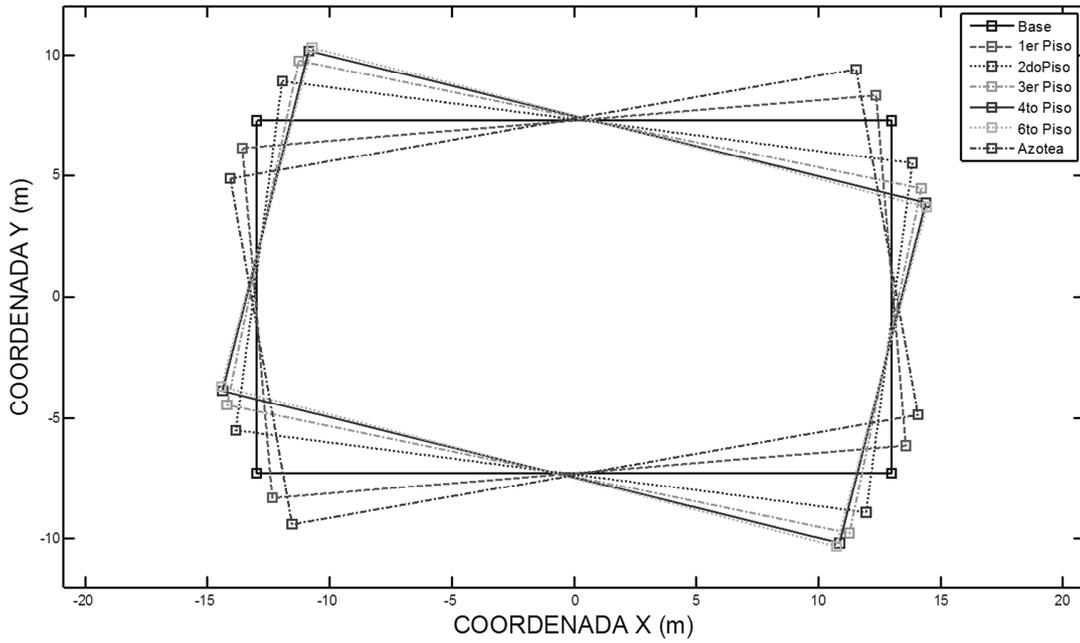


Figura B.13 Configuración 2da forma modal de torsión, obtenida por AEC

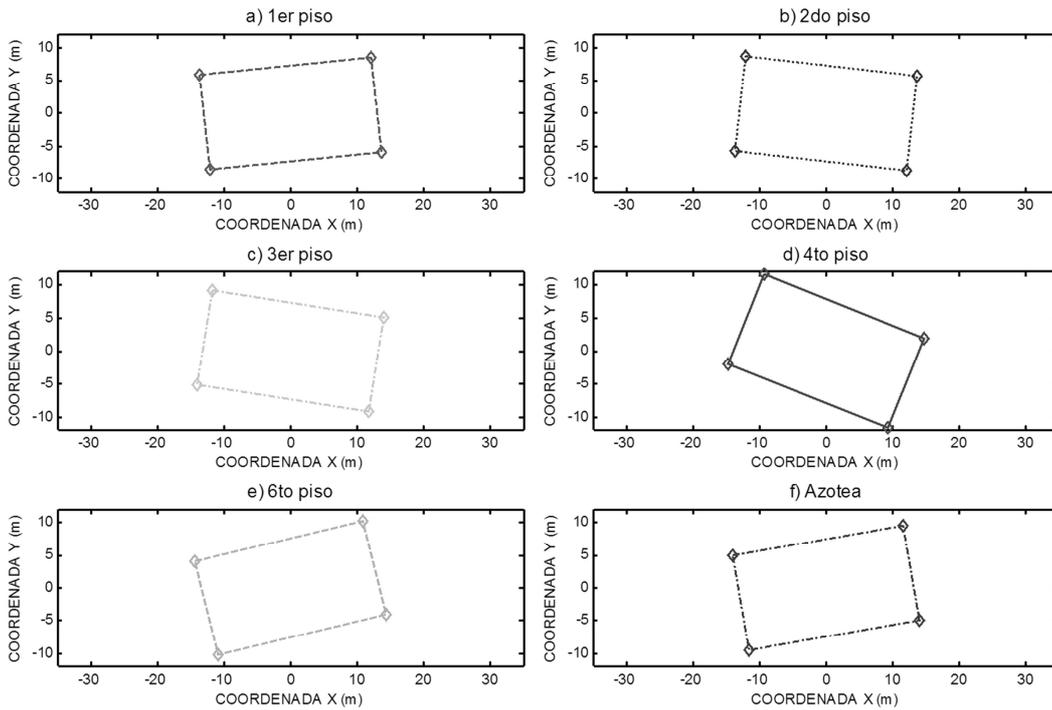
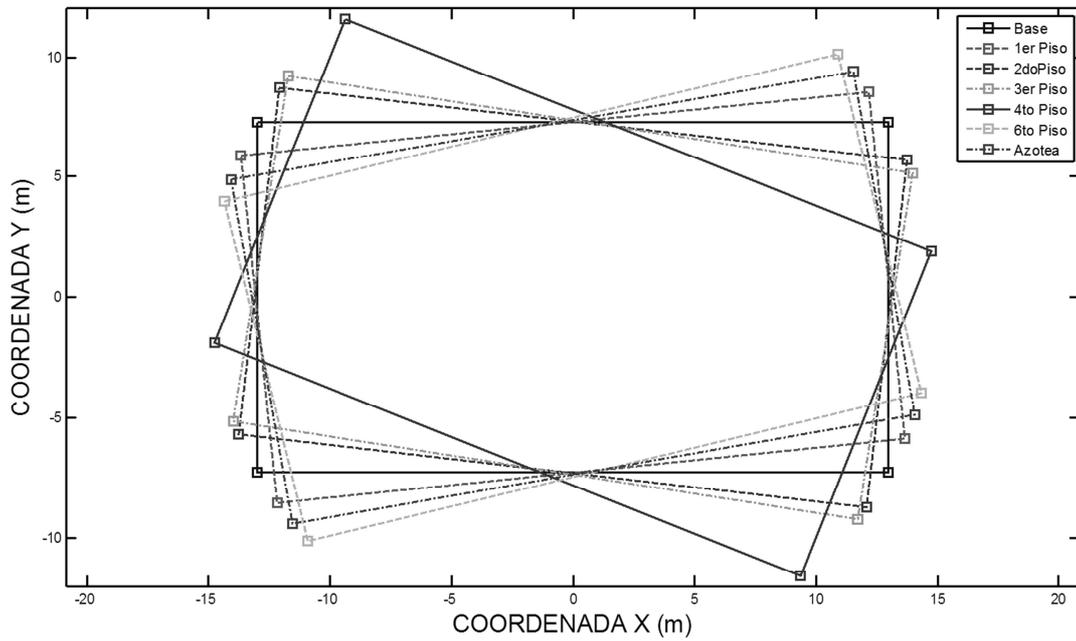


Figura B.14 Configuración 3ra forma modal de torsión, obtenida por AEC

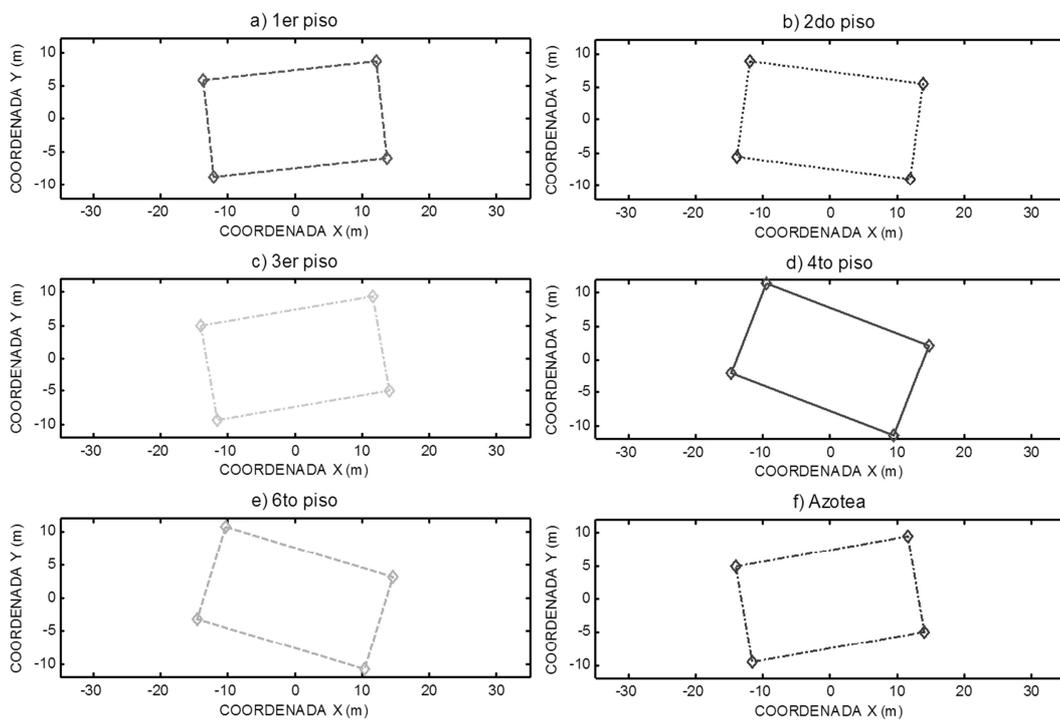
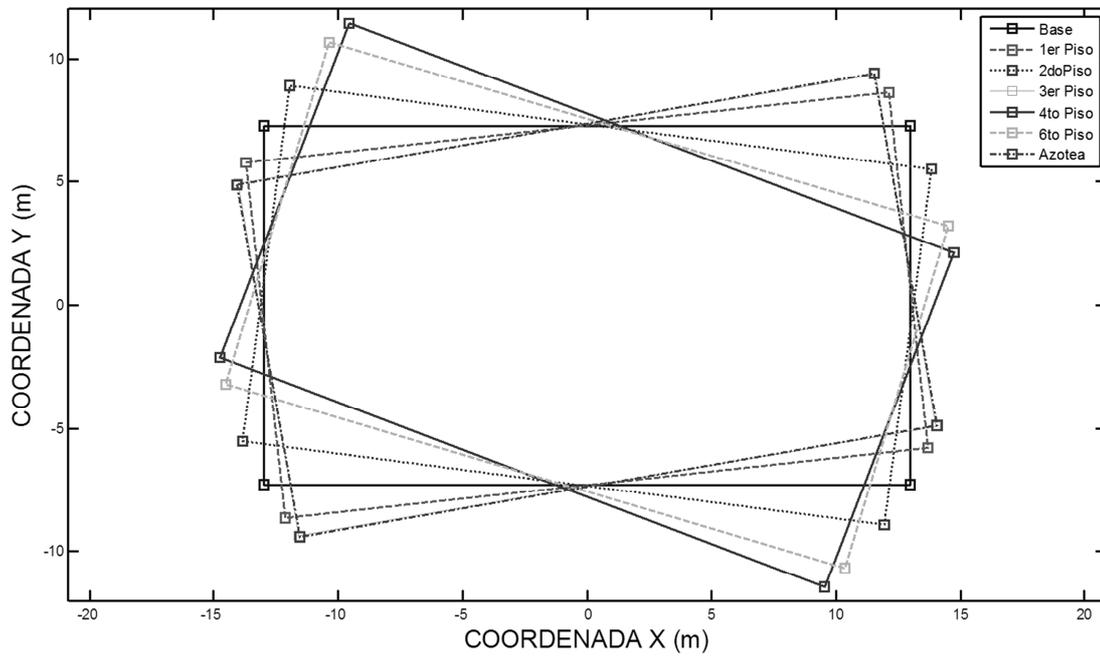


Figura B.15 Configuración 4ta forma modal de torsión, obtenida por AEC

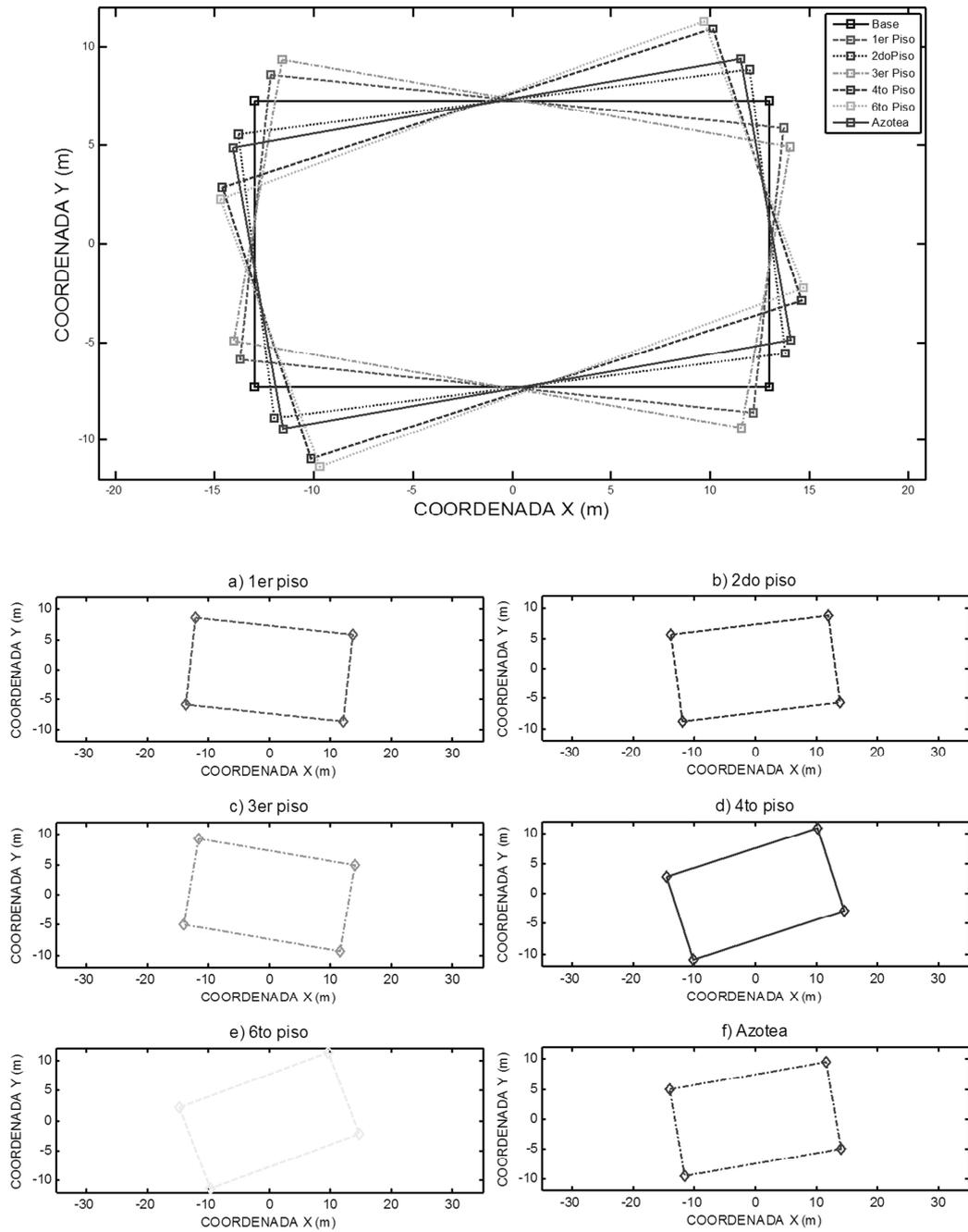


Figura B.16 Configuración 5ta forma modal de torsión, obtenida por AEC

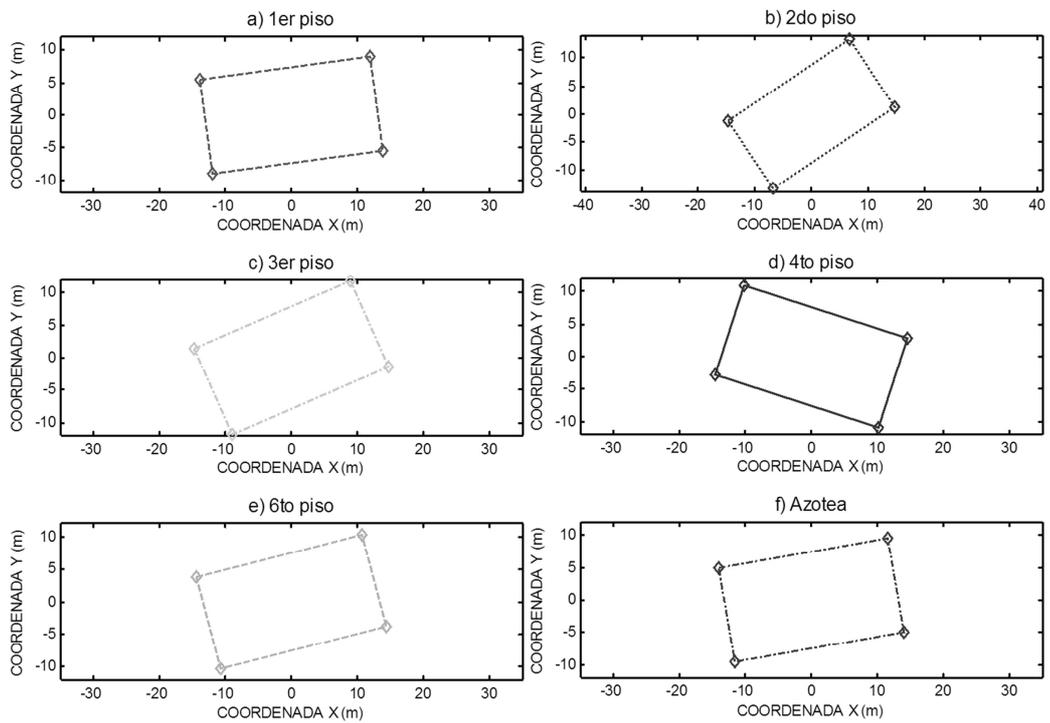
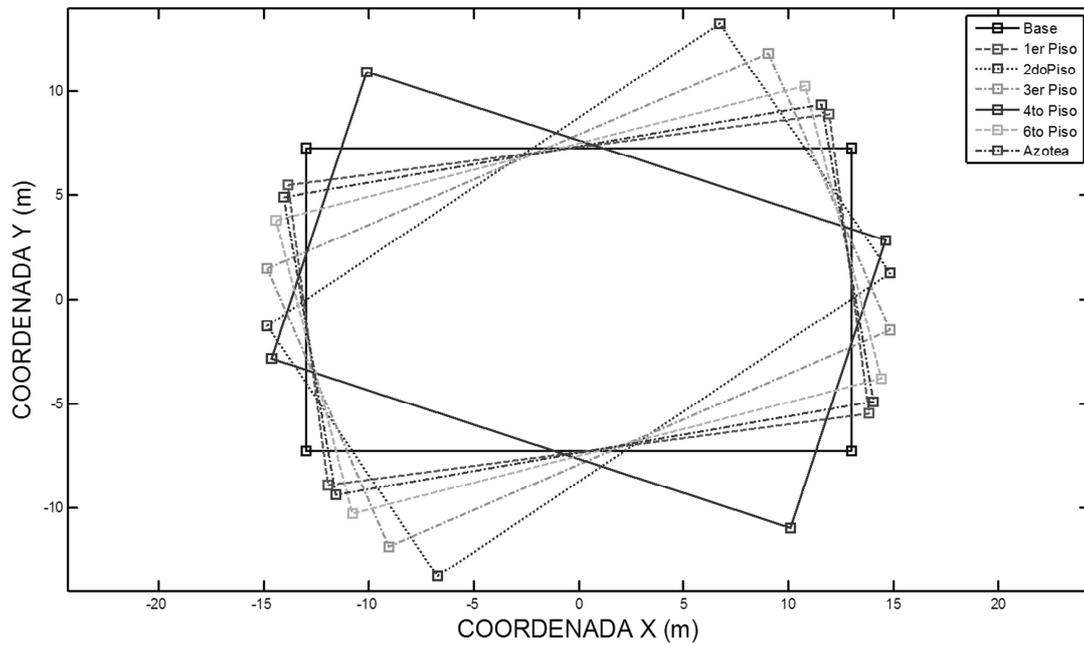


Figura B.17 Configuración 6ta forma modal de torsión, obtenida por AEC

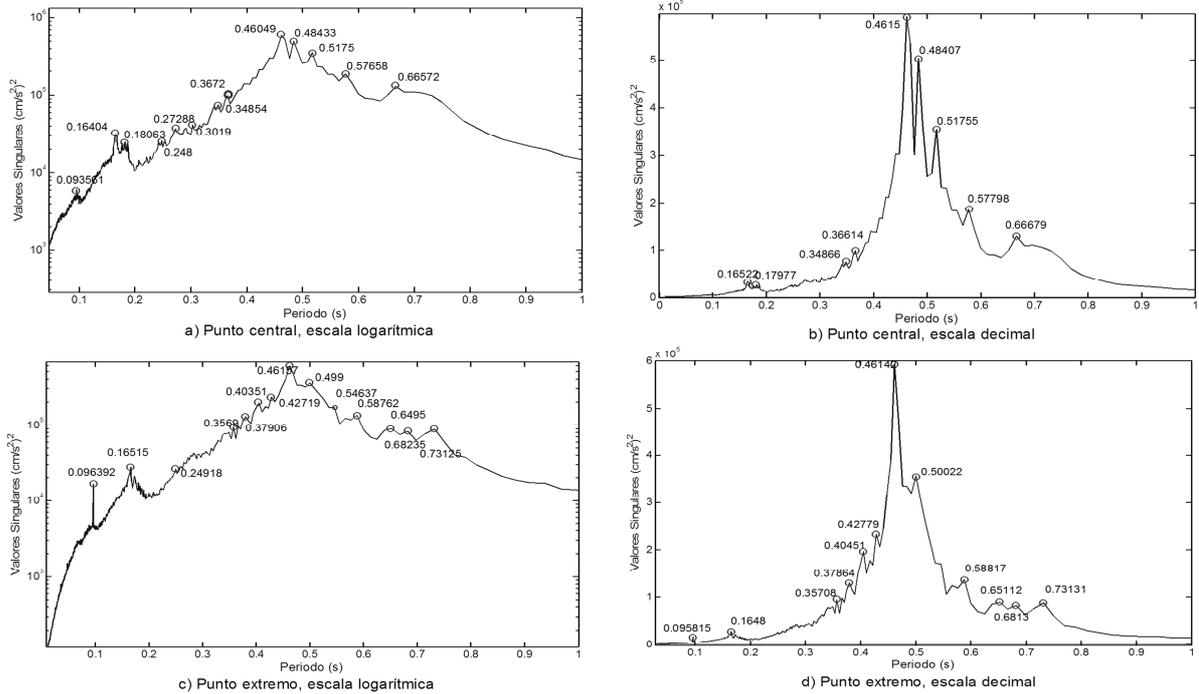


Figura B.18 Variación de valores singulares DDF para la dirección X

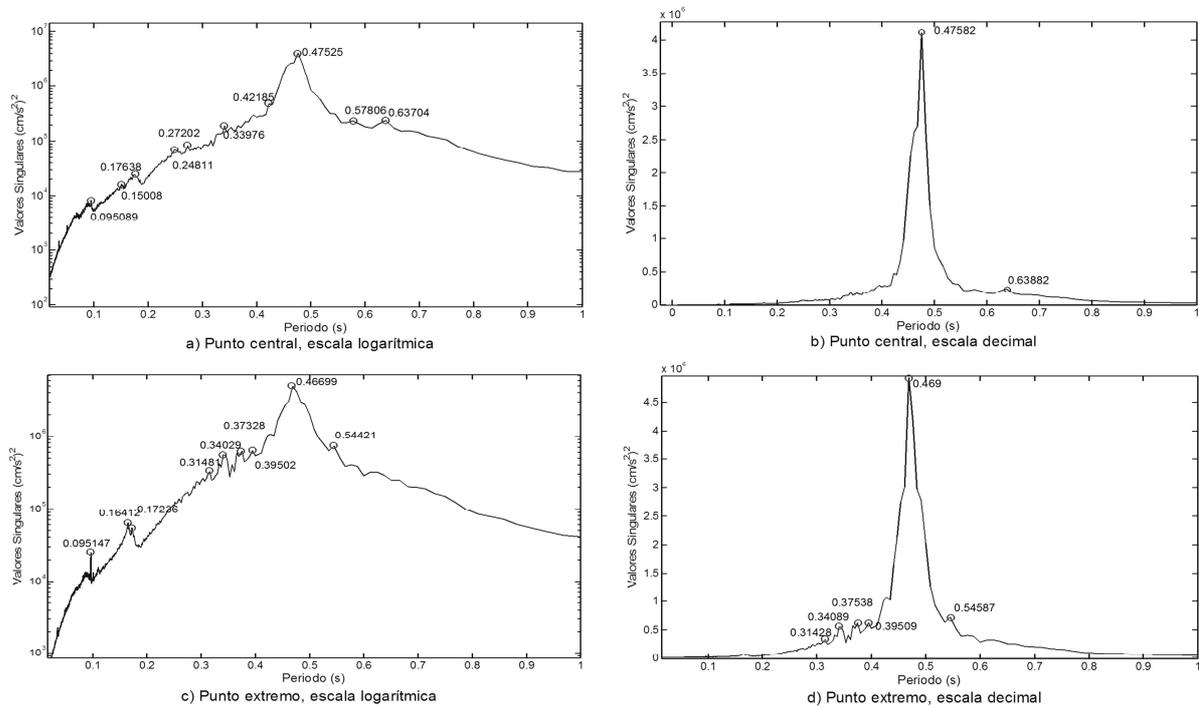


Figura B.19 Variación de valores singulares DDF para la dirección Y

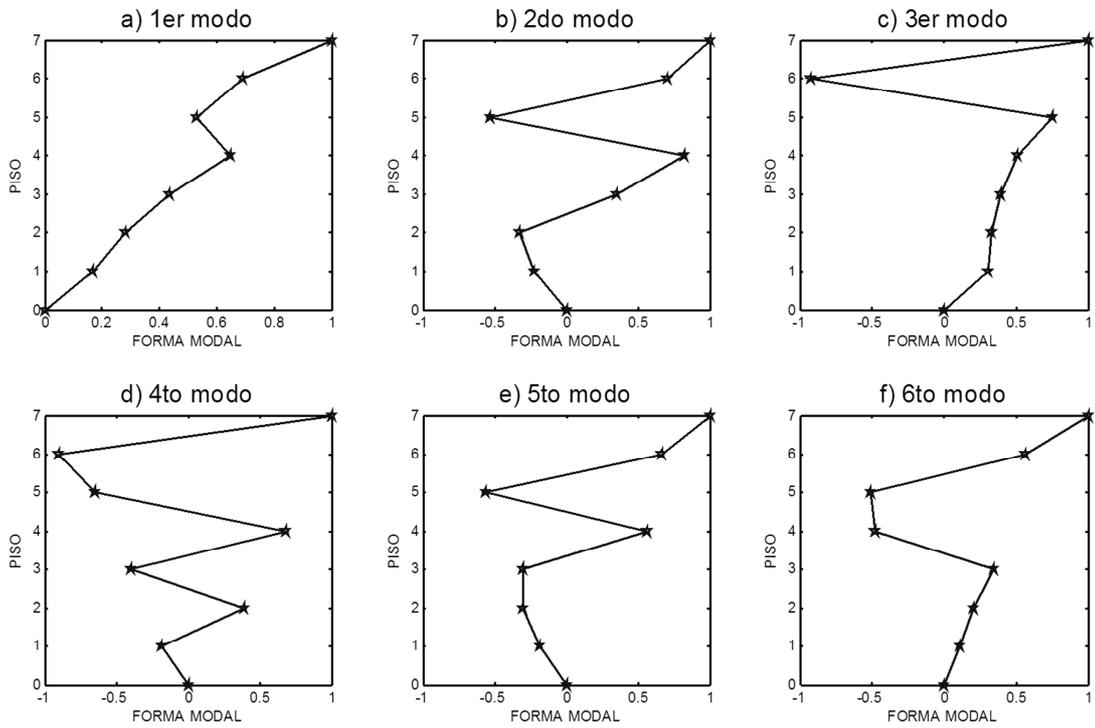


Figura B.20 Configuración formas modales dirección X, obtenidas por DDF

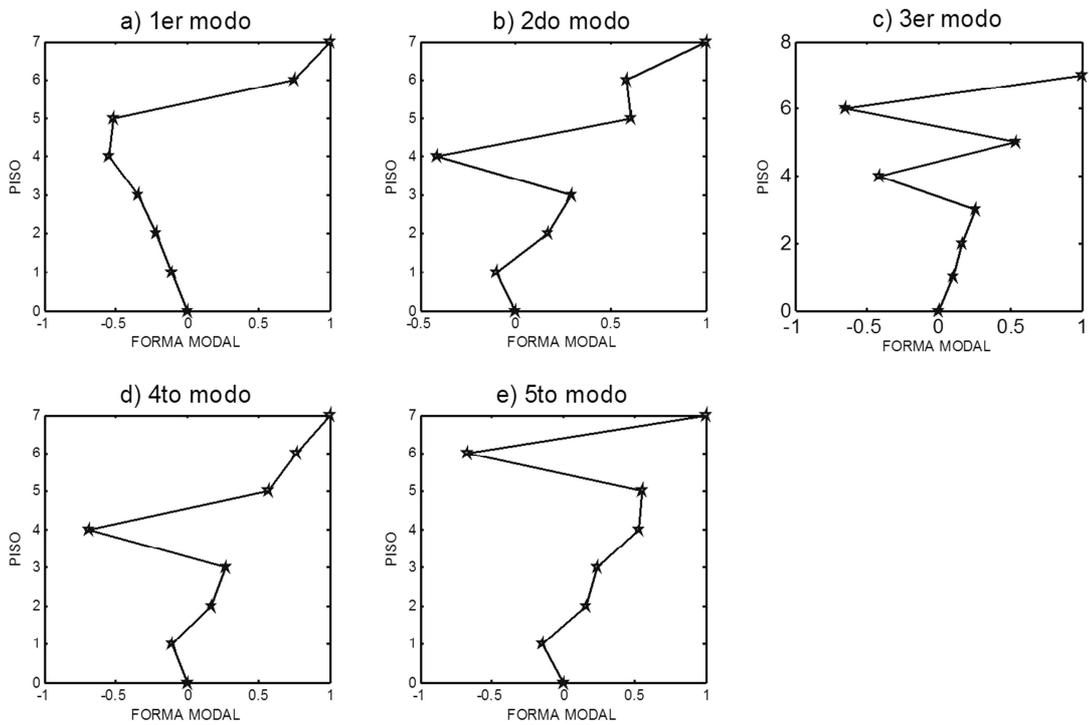


Figura B.21 Configuración formas modales dirección Y, obtenidas por DDF

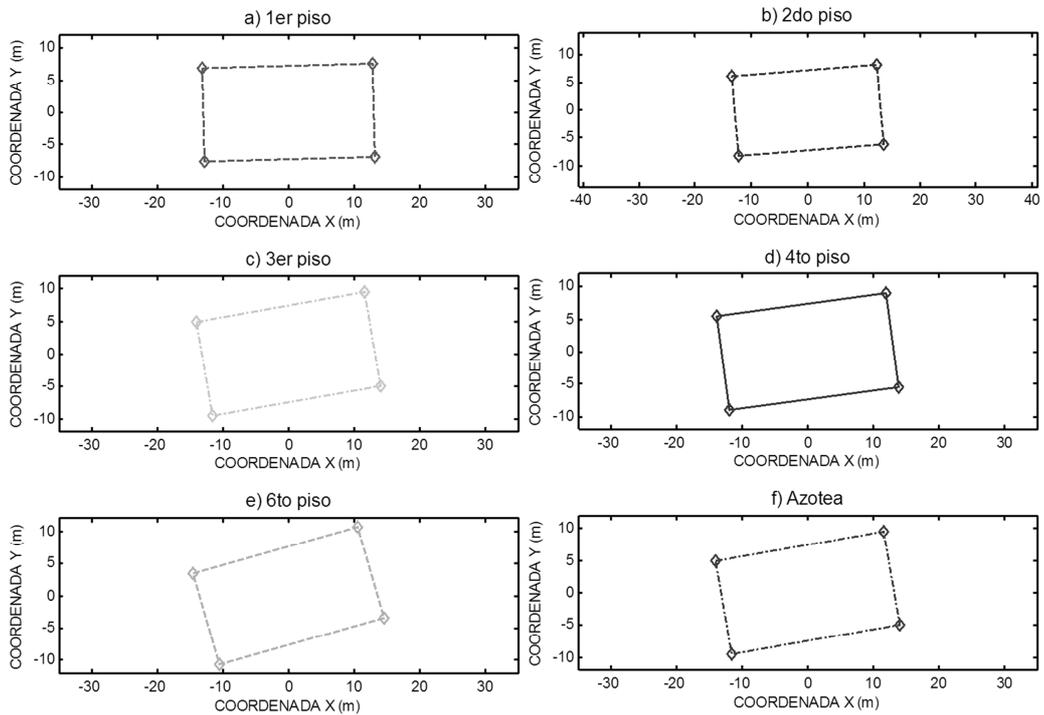
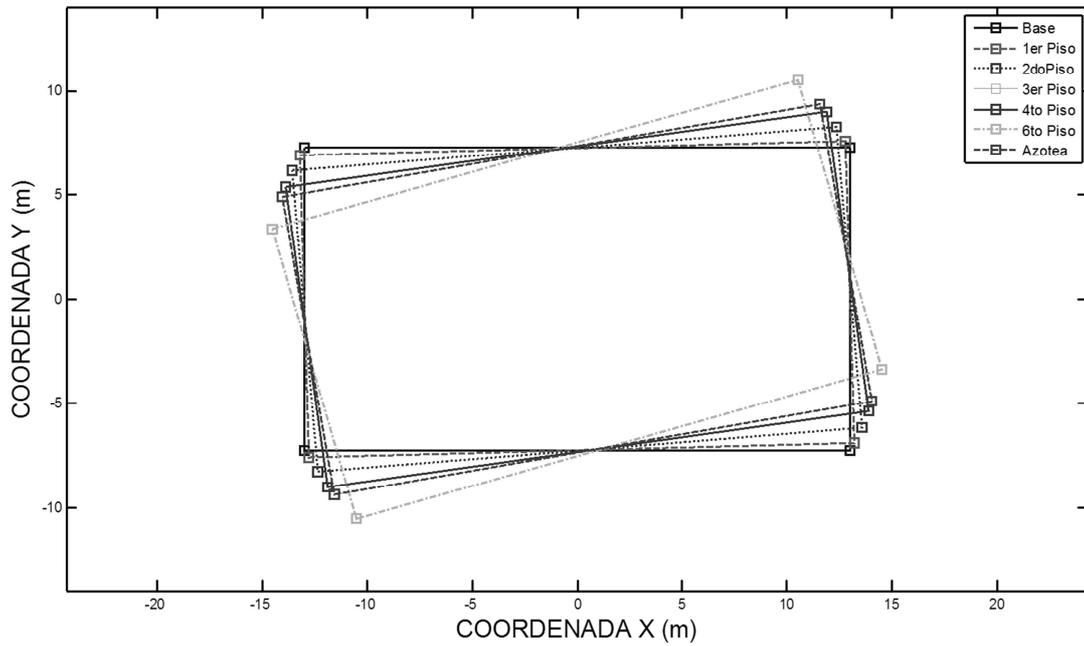


Figura B.22 Configuración 1ra forma modal de torsión, obtenida por DDF

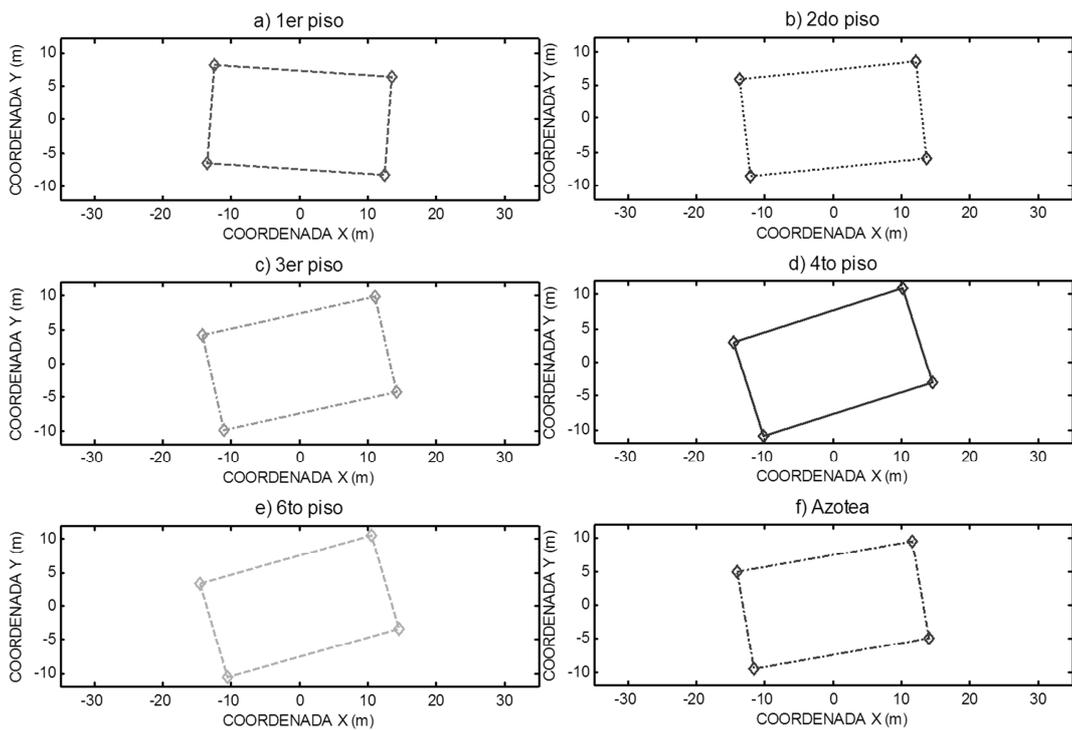
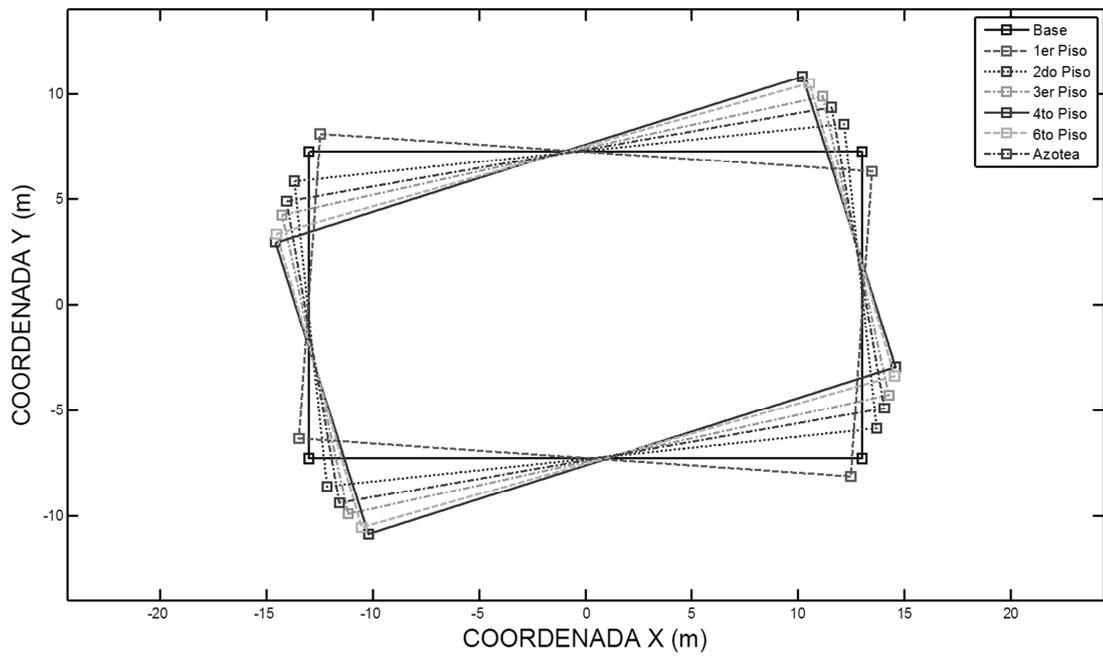


Figura B.23 Configuración 2da forma modal de torsión, obtenida por DDF

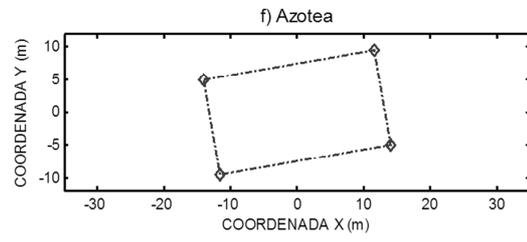
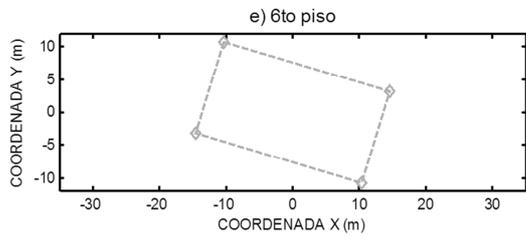
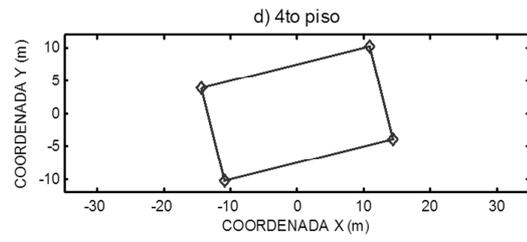
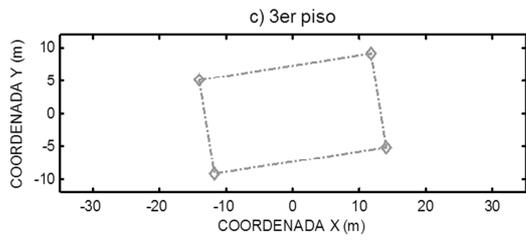
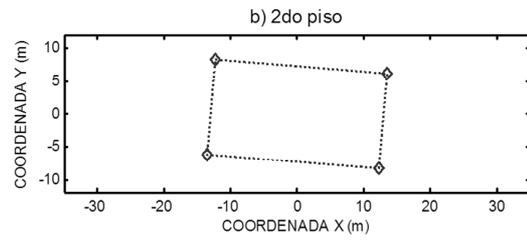
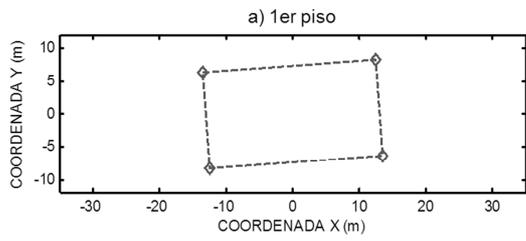
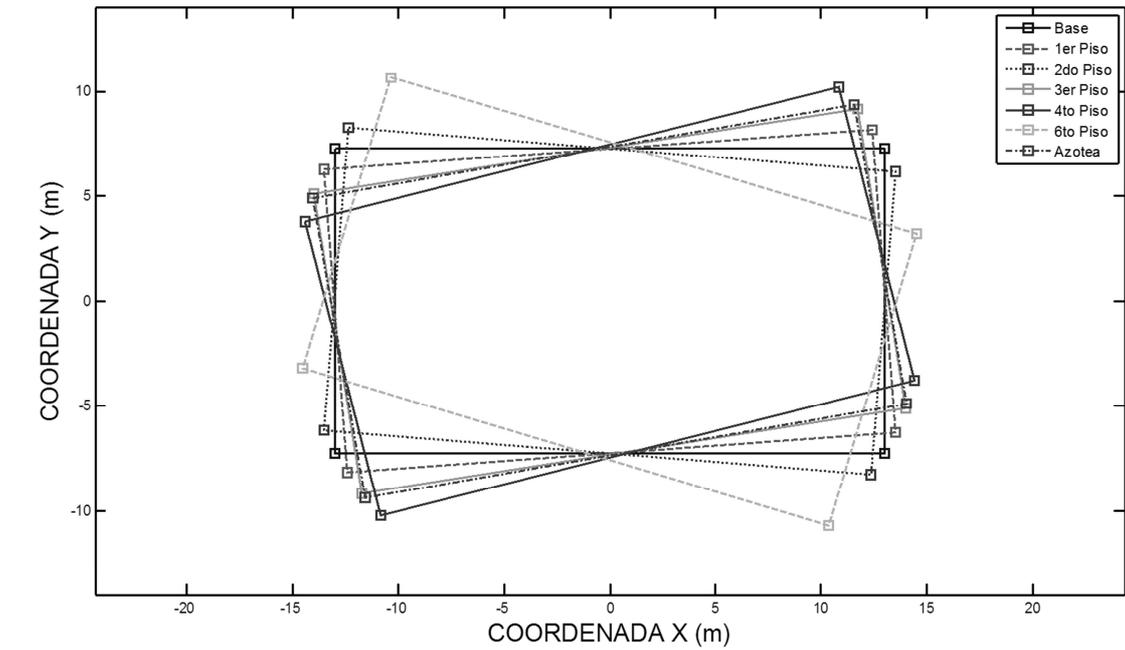


Figura B.24 Configuración 3ra forma modal de torsión, obtenida por DDF

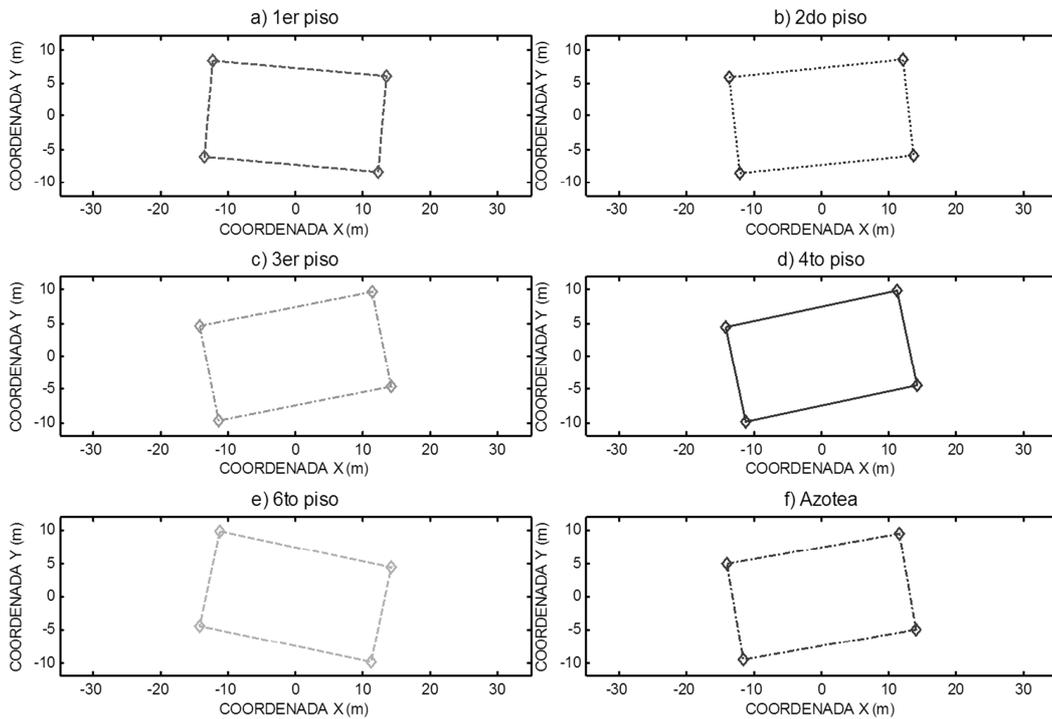
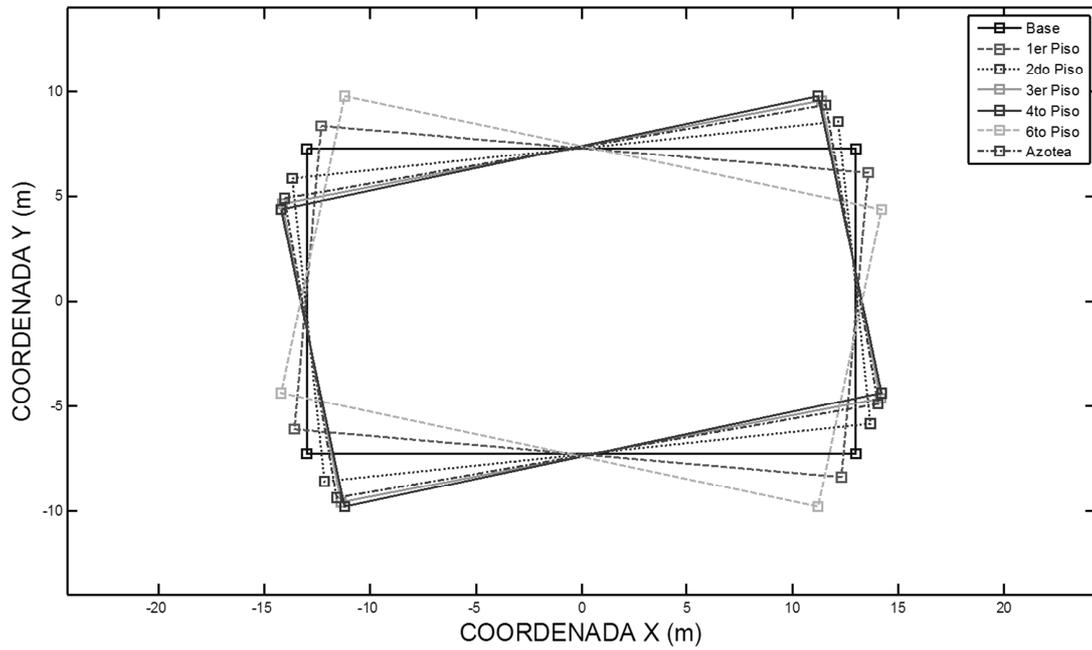


Figura B.25 Configuración 4ta forma modal de torsión, obtenida por DDF

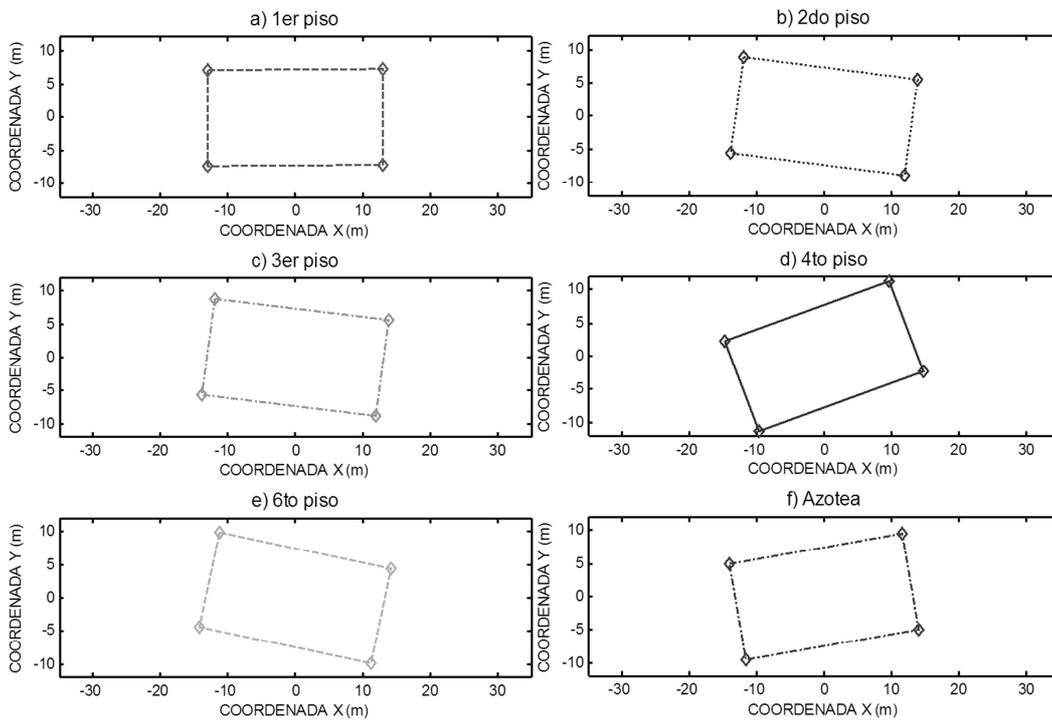
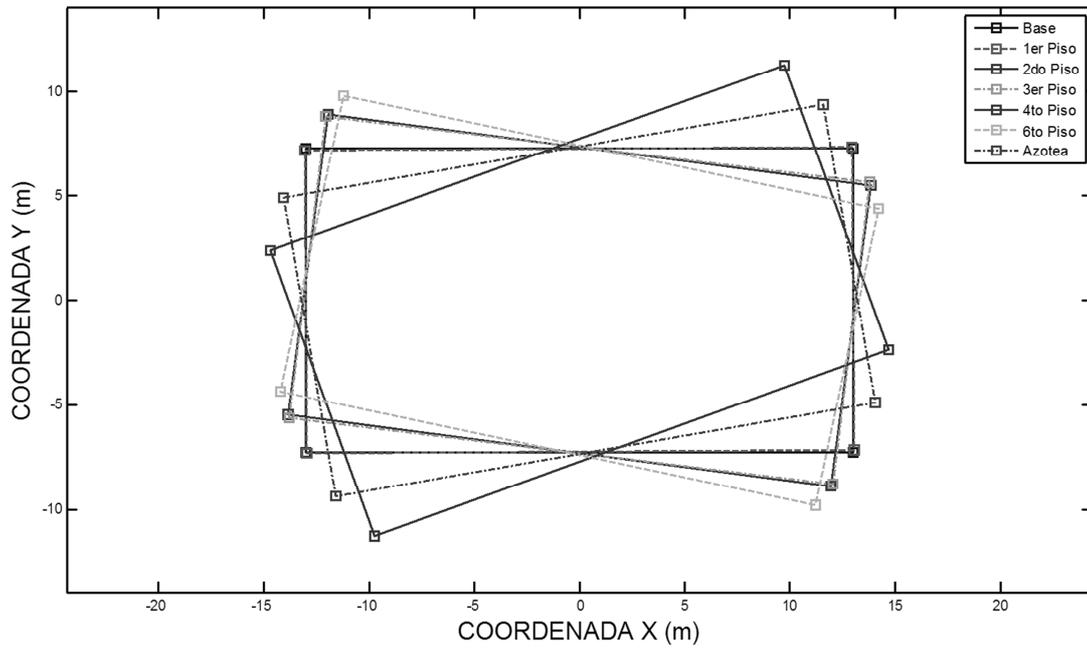


Figura B.26 Configuración 5ta forma modal de torsión, obtenida por DDF

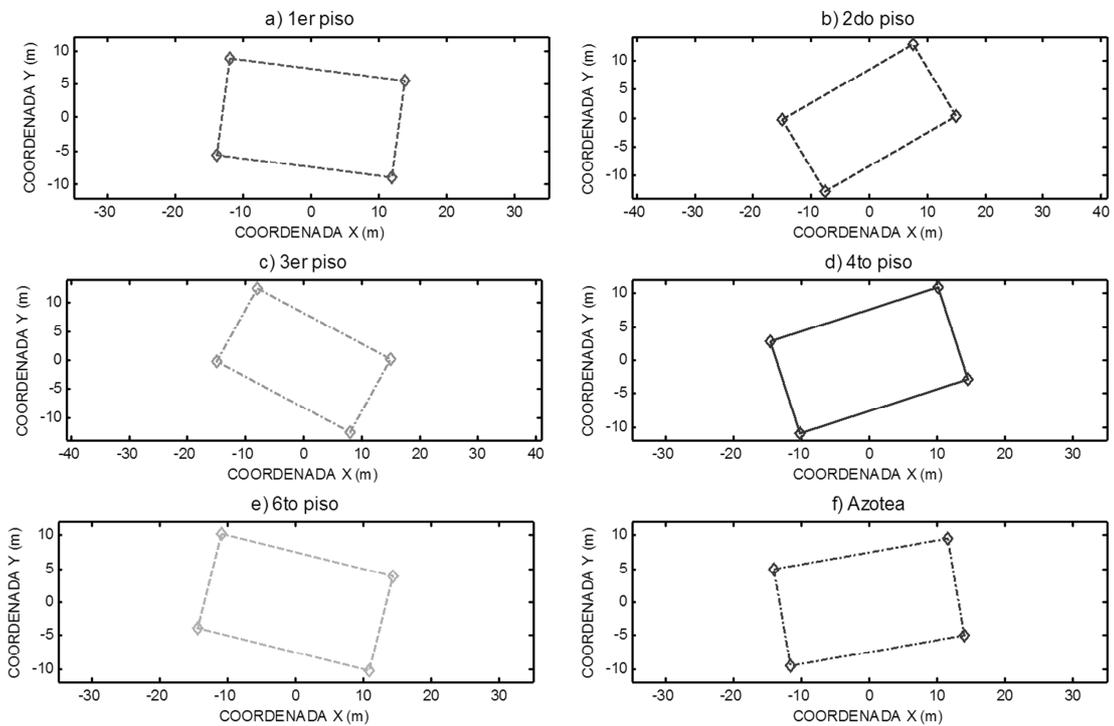
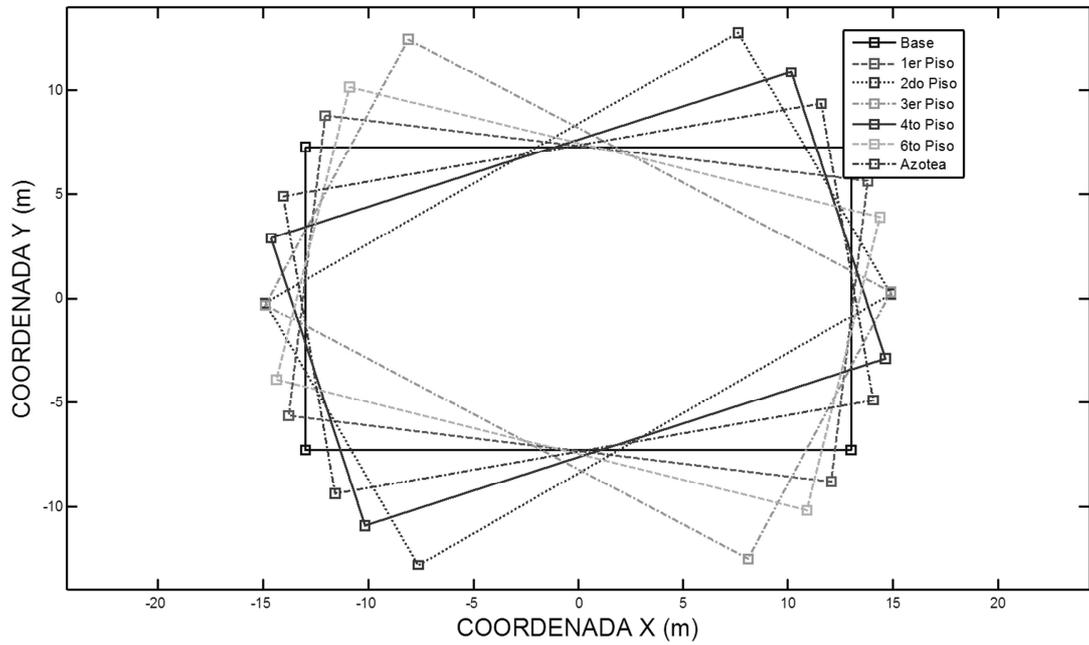


Figura B.27 Configuración 6ta forma modal de torsión, obtenida por DDF

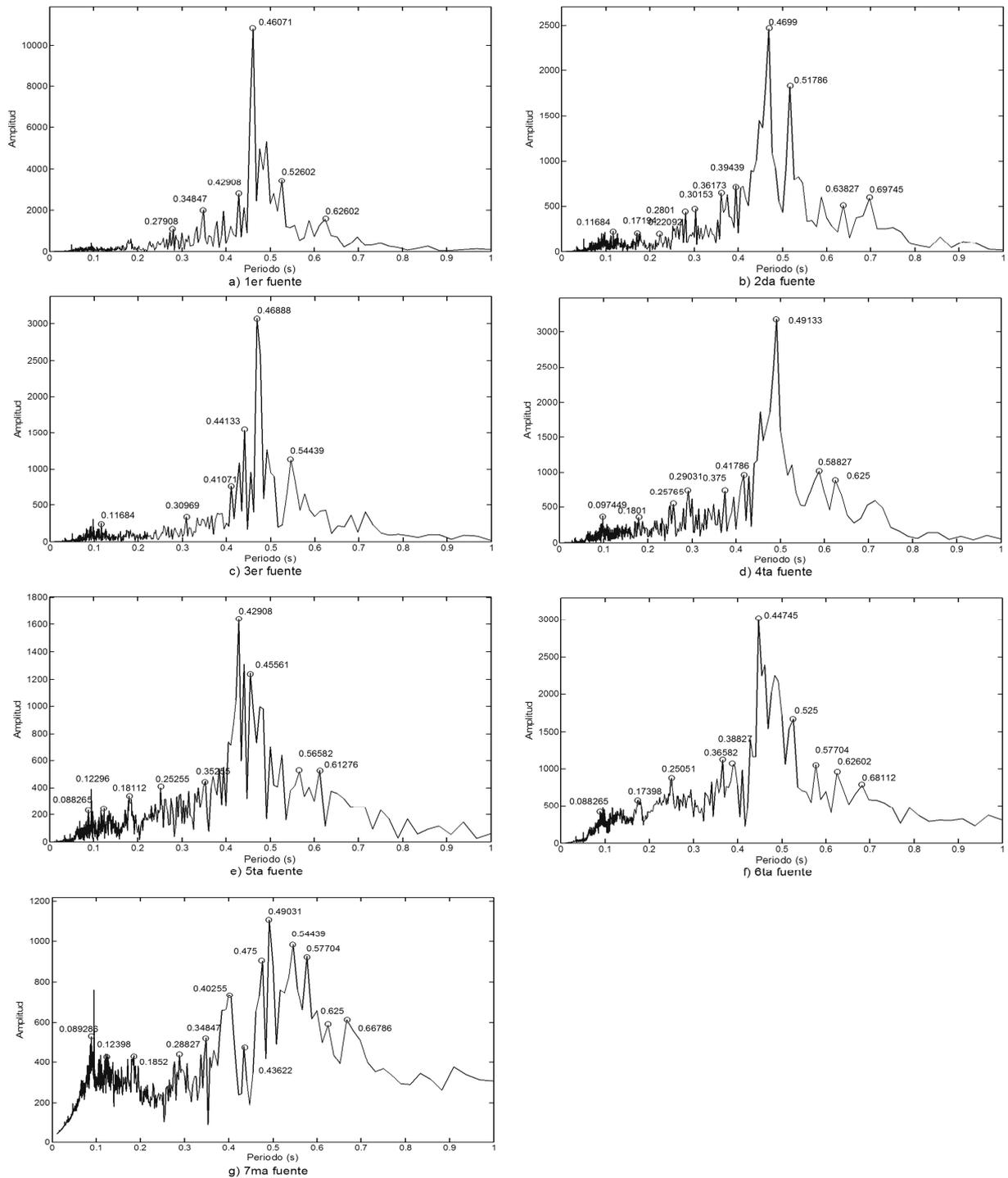


Figura B.28 Espectros de Fourier de las fuentes de los registros del centro de la estructura en dirección Y

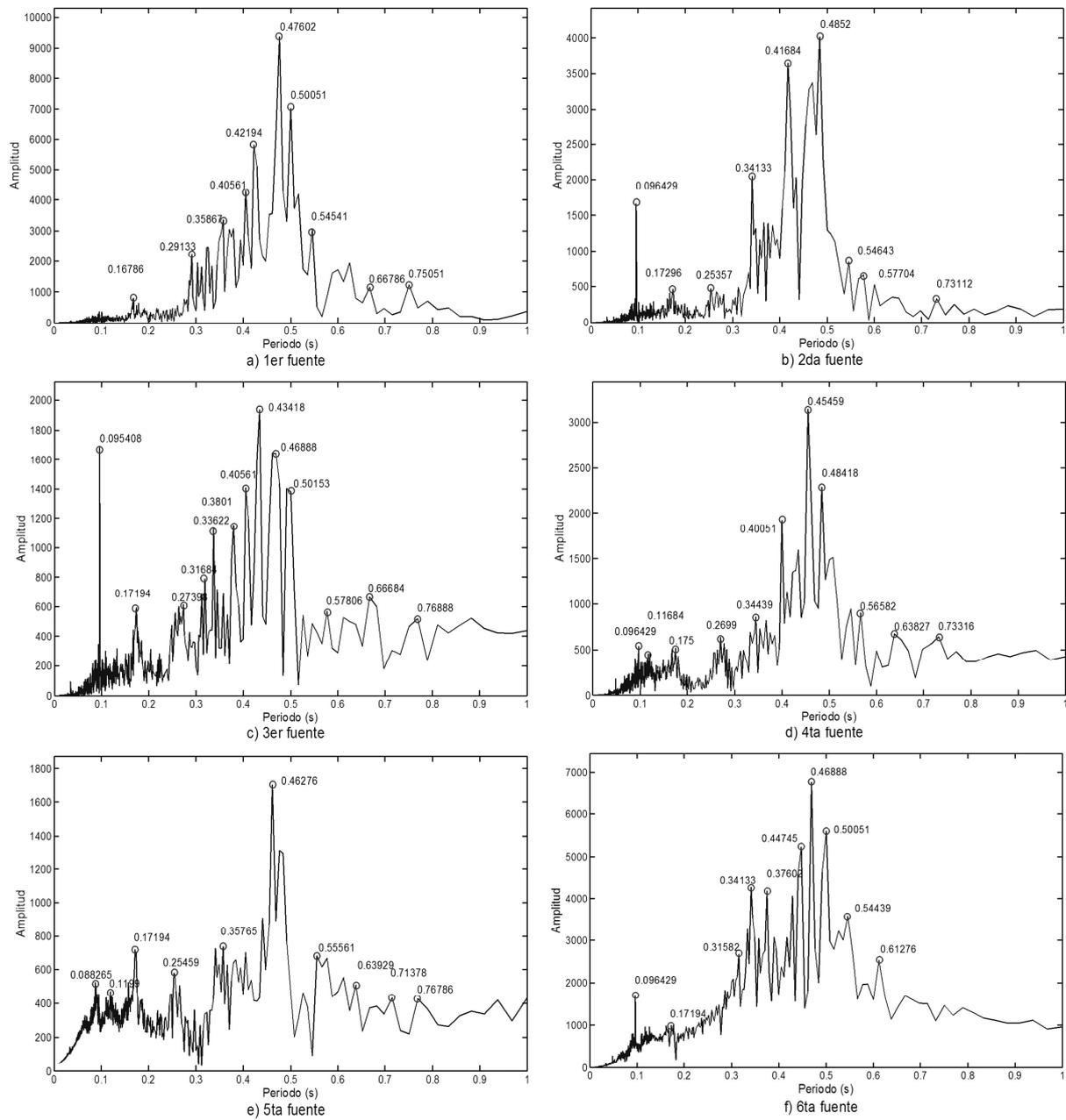


Figura B.29 Espectros de Fourier de las fuentes de los registros en un extremo de la estructura en dirección Y

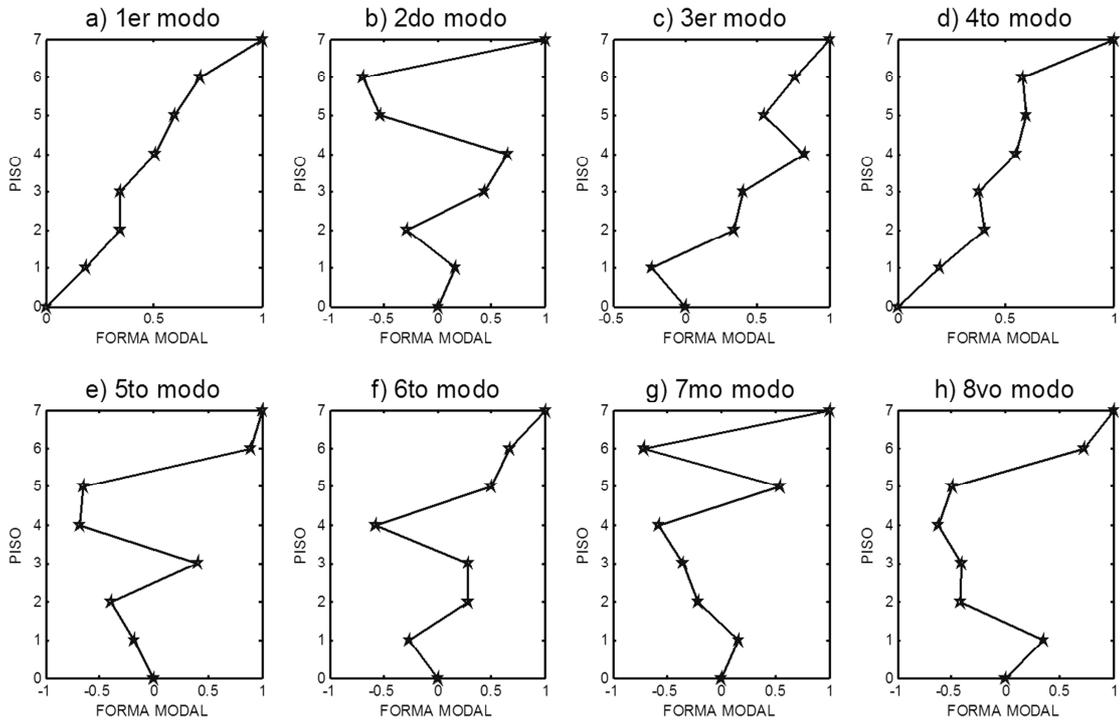


Figura B.30 Configuración formas modales dirección X, obtenidas por ACI

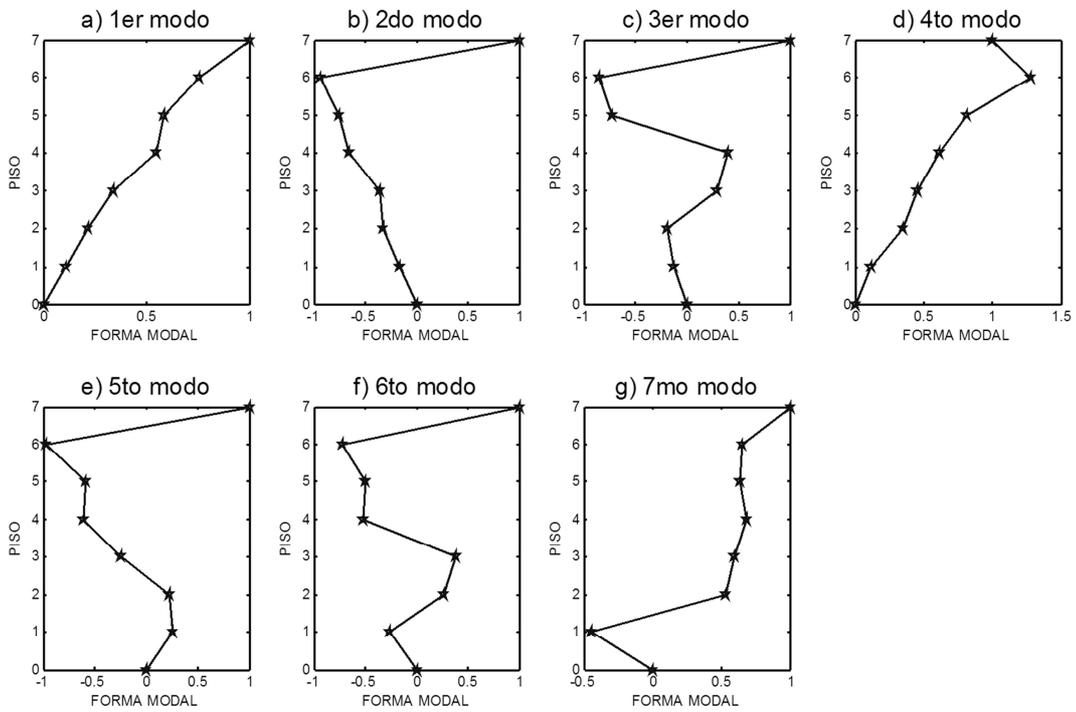


Figura B.31 Configuración formas modales dirección Y, obtenidas por ACI

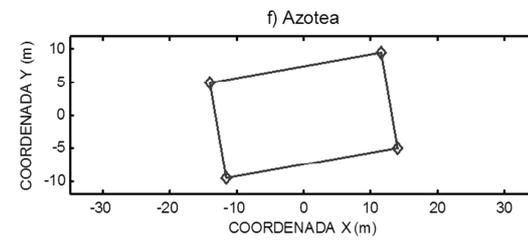
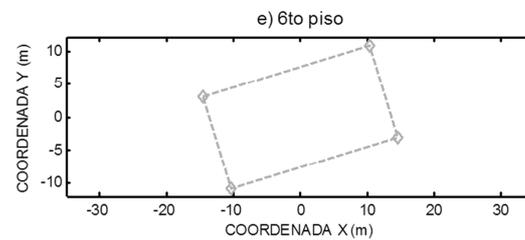
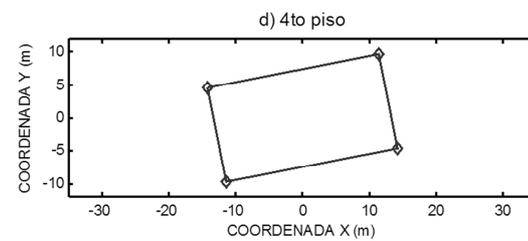
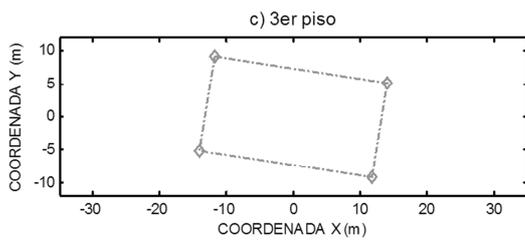
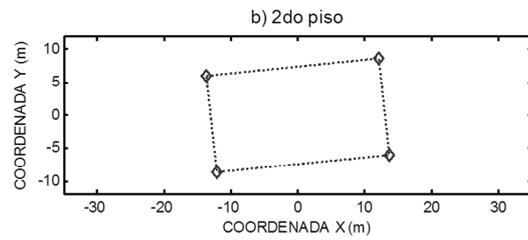
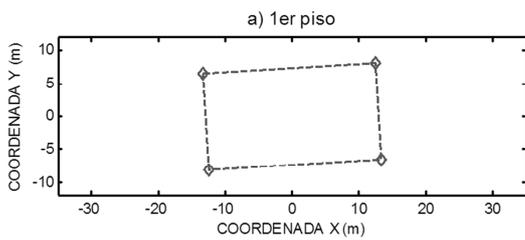
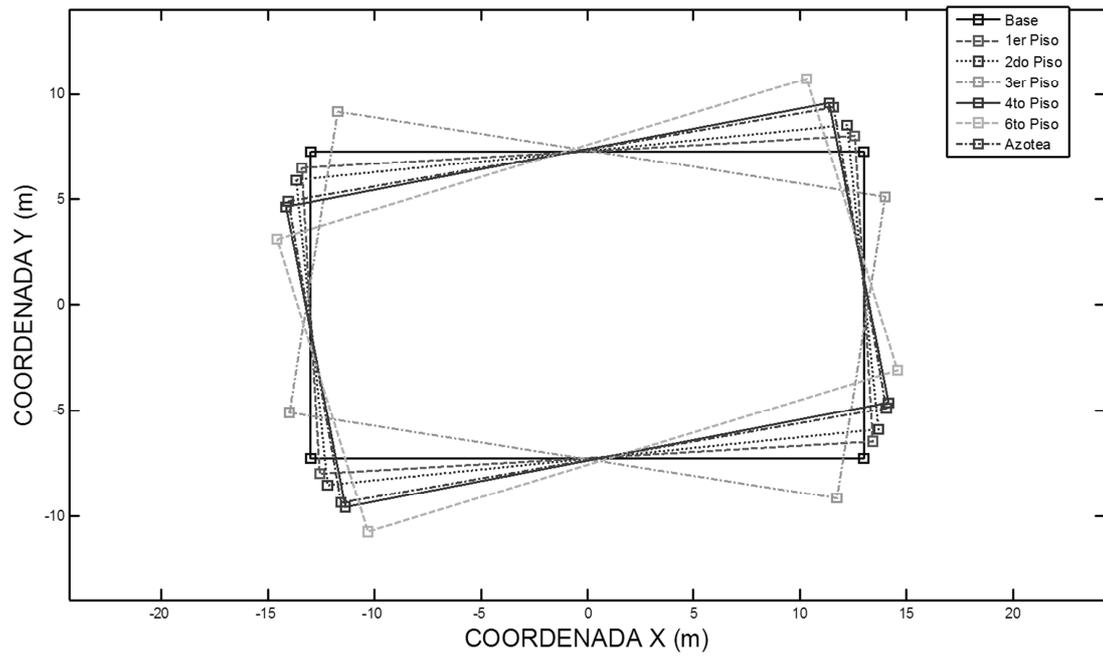


Figura B.32 Configuración 1ra forma modal de torsión, obtenida por ACI

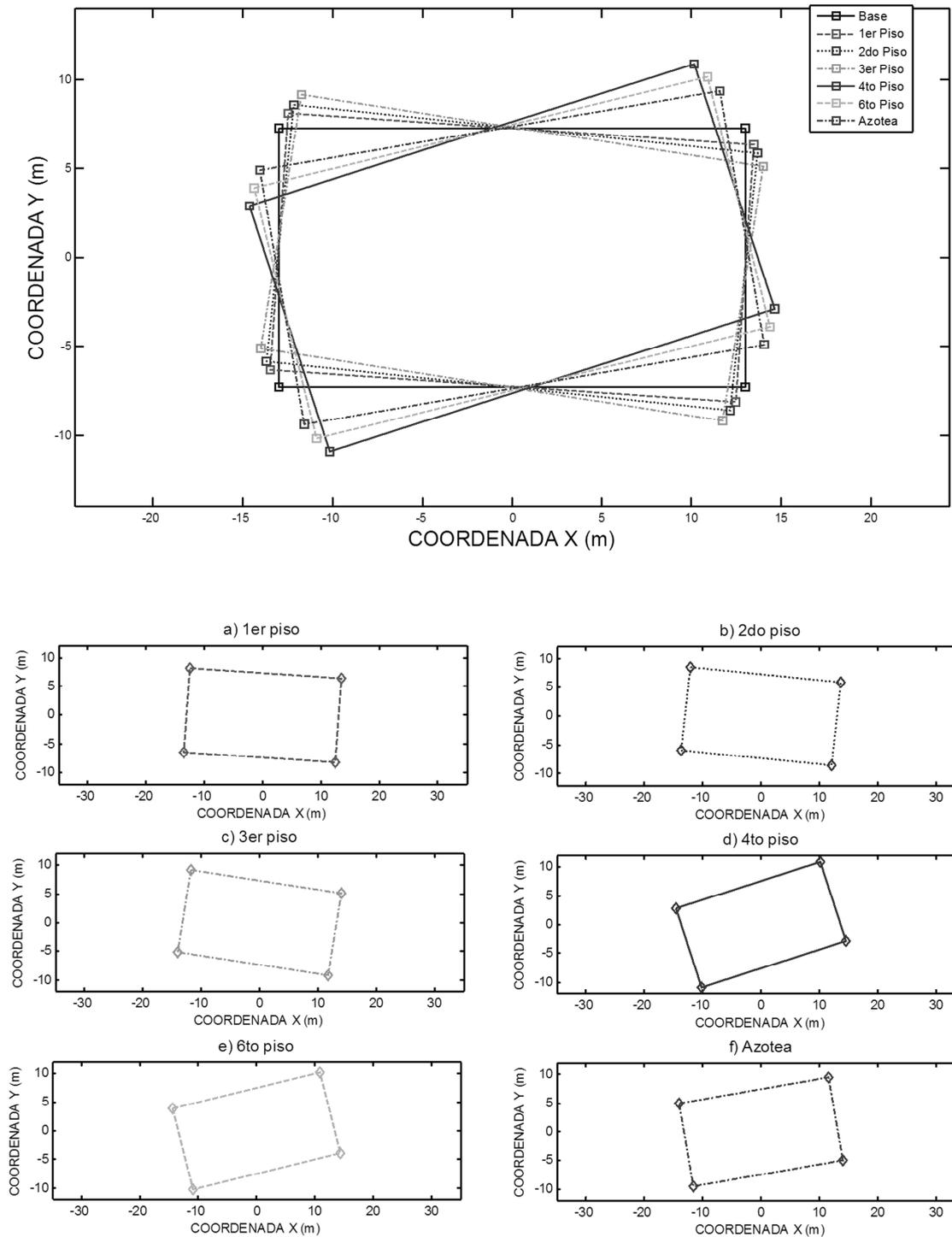


Figura B.33 Configuración 2da forma modal de torsión, obtenida por ACI

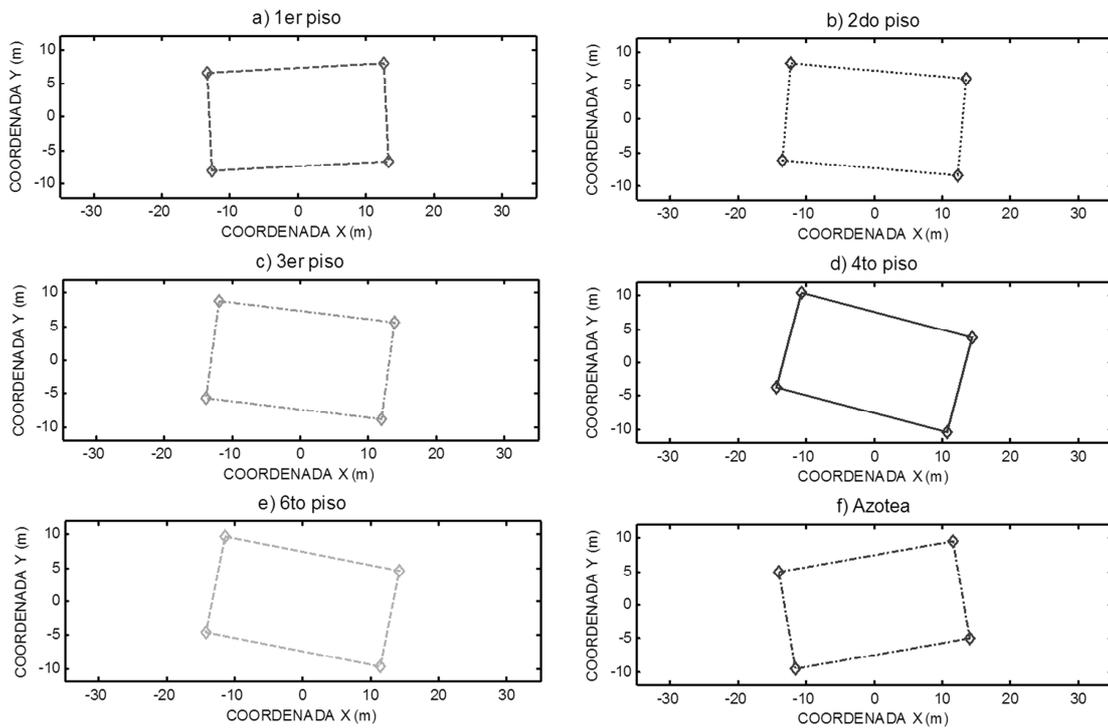
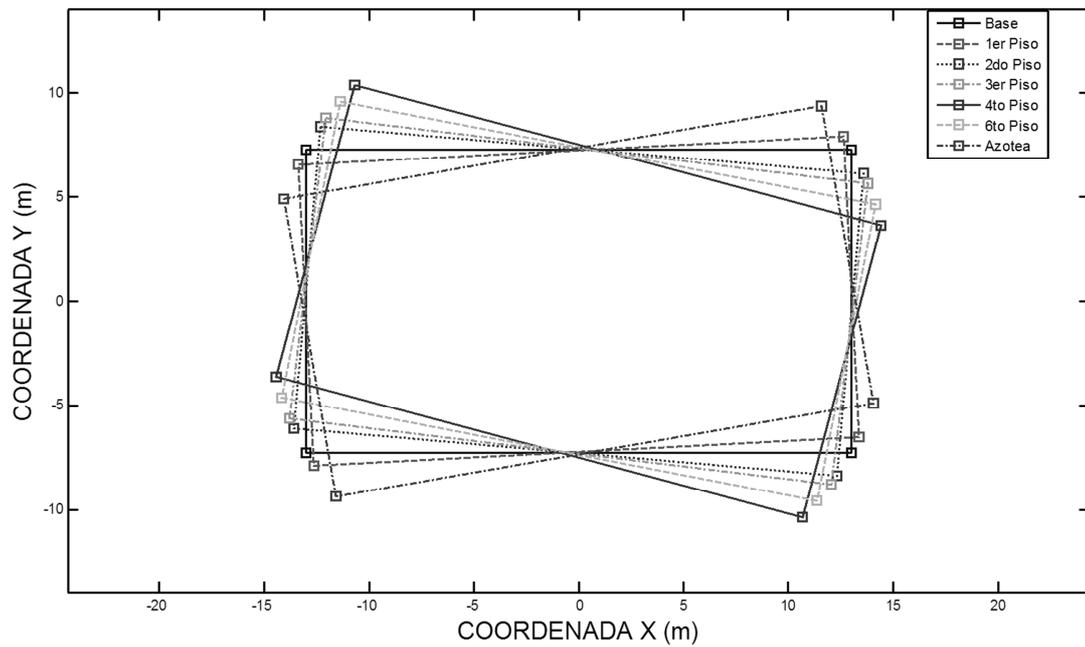


Figura B.34 Configuración 3ra forma modal de torsión, obtenida por ACI

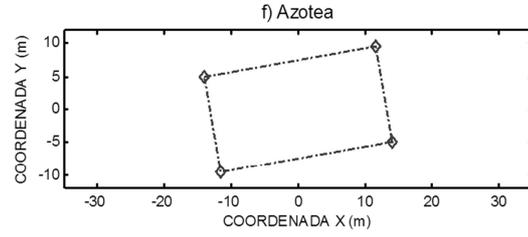
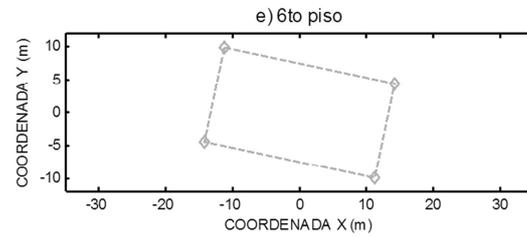
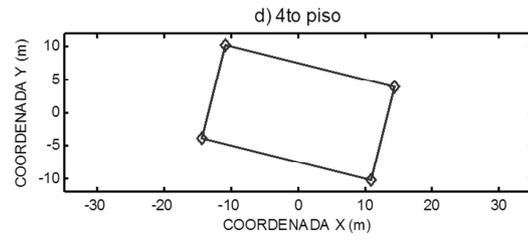
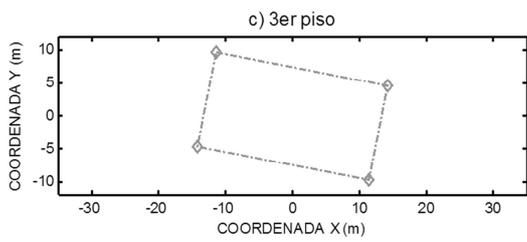
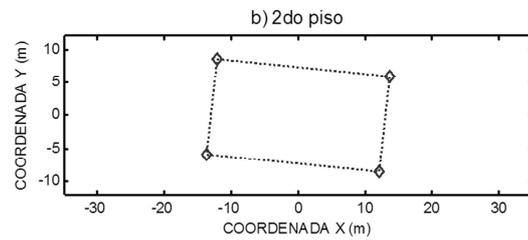
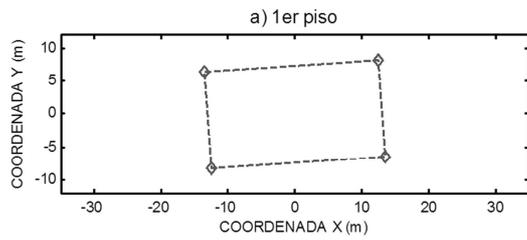
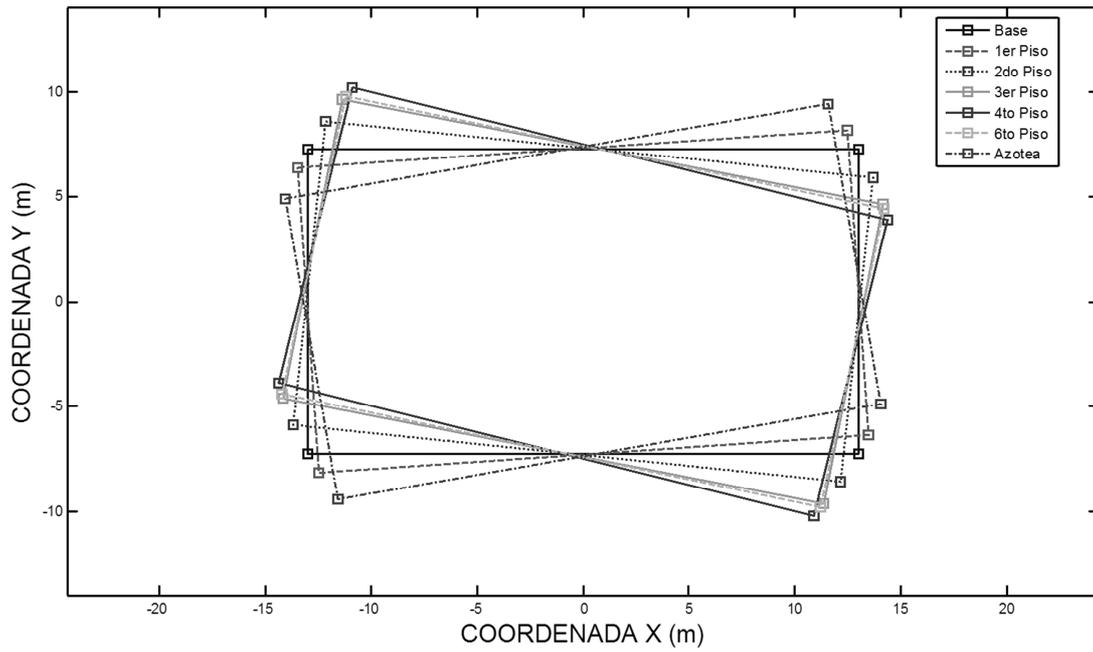


Figura B.35 Configuración 4ta forma modal de torsión, obtenida por ACI

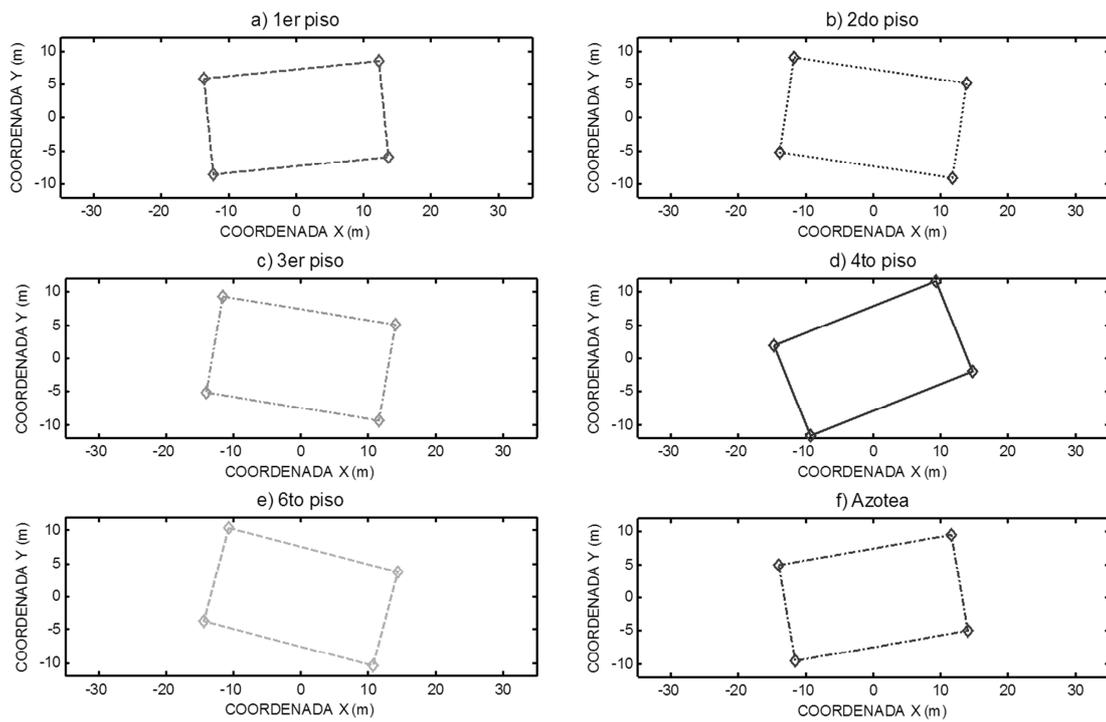
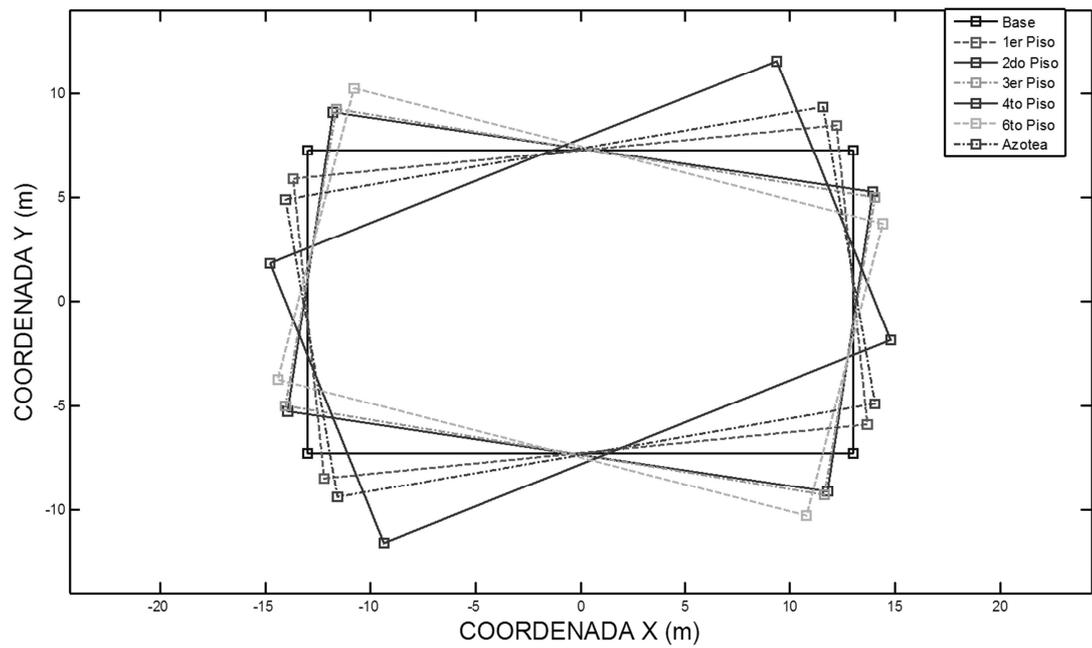


Figura B.36 Configuración 5ta forma modal de torsión, obtenida por ACI

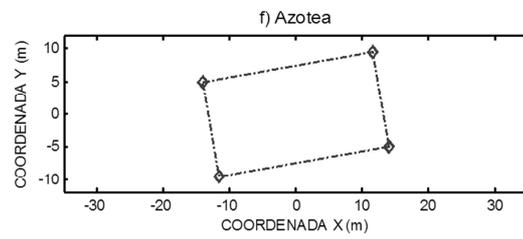
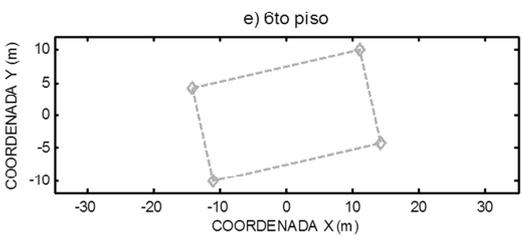
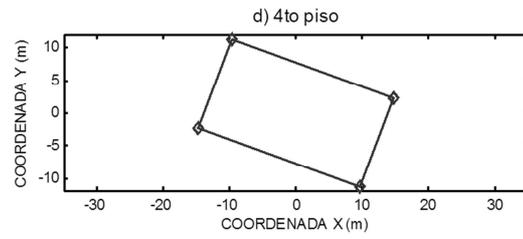
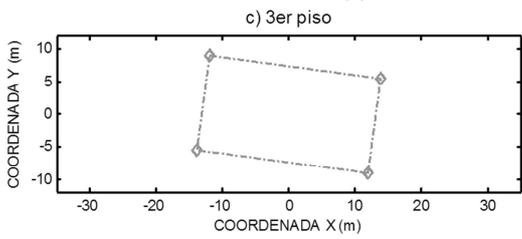
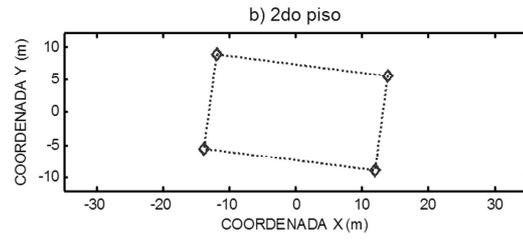
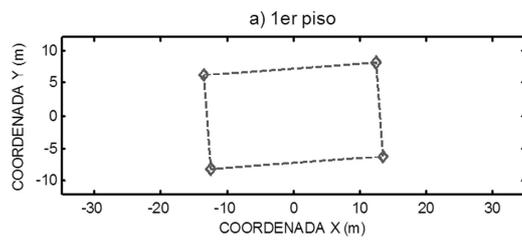
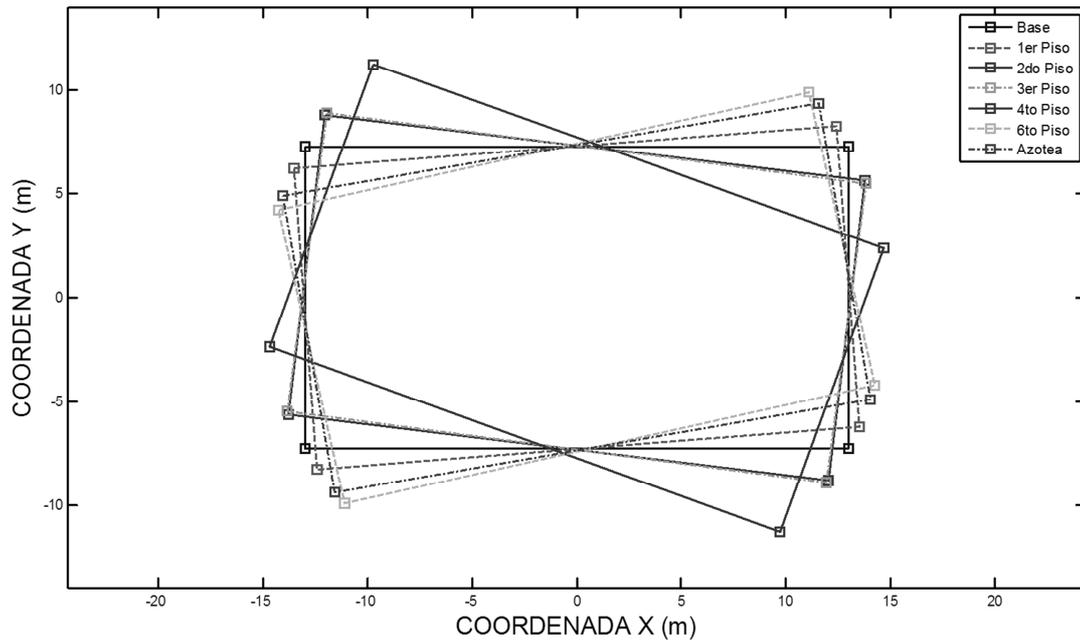


Figura B.37 Configuración 6ta forma modal de torsión, obtenida por ACI

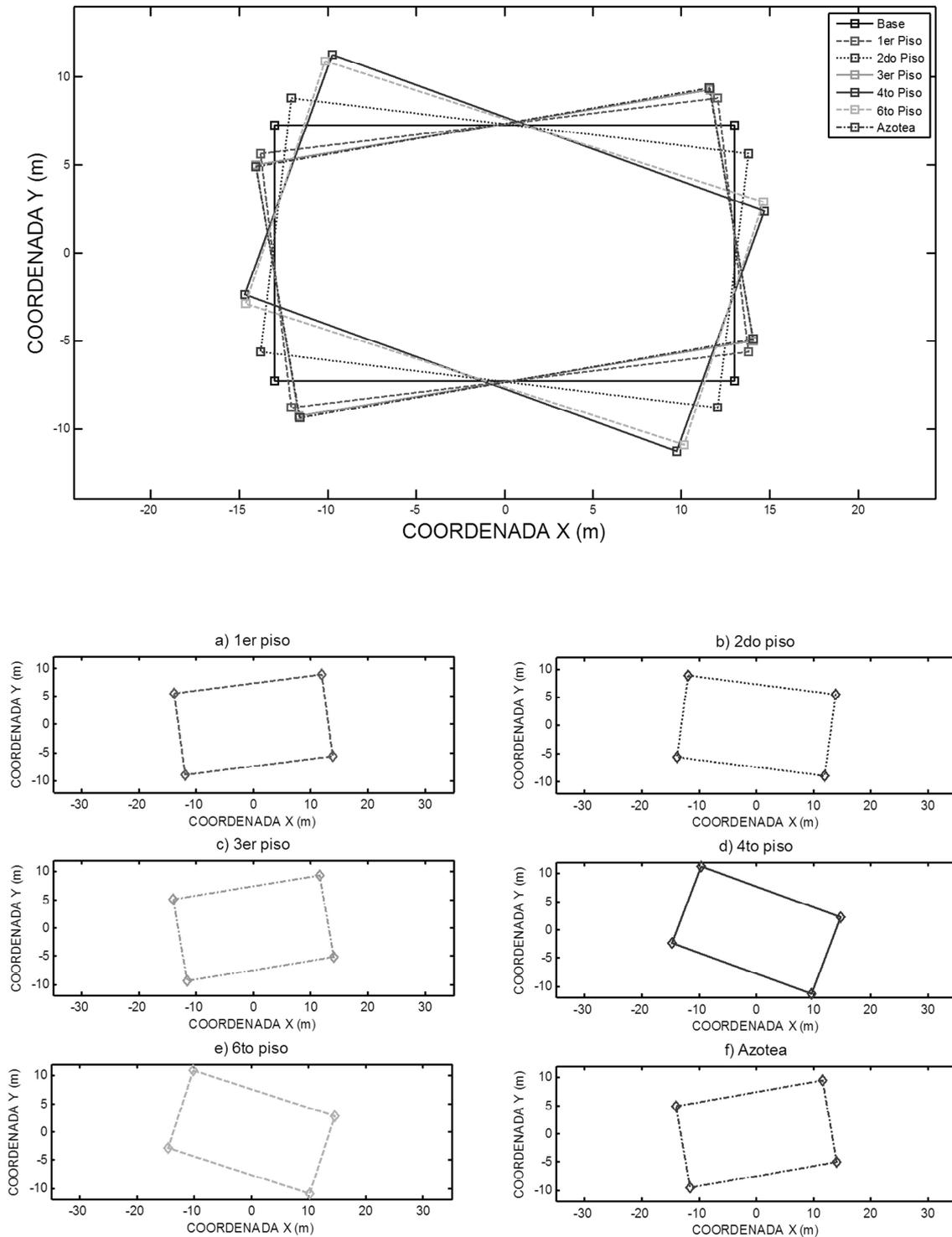


Figura B.38 Configuración 7ma forma modal de torsión, obtenida por ACI

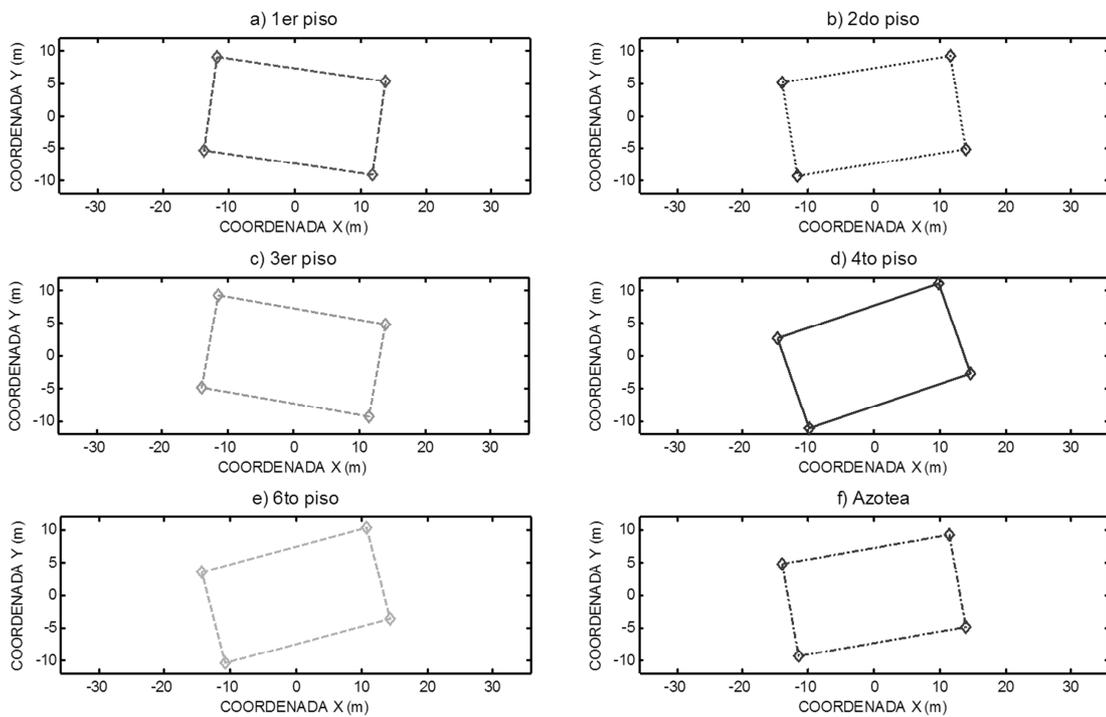
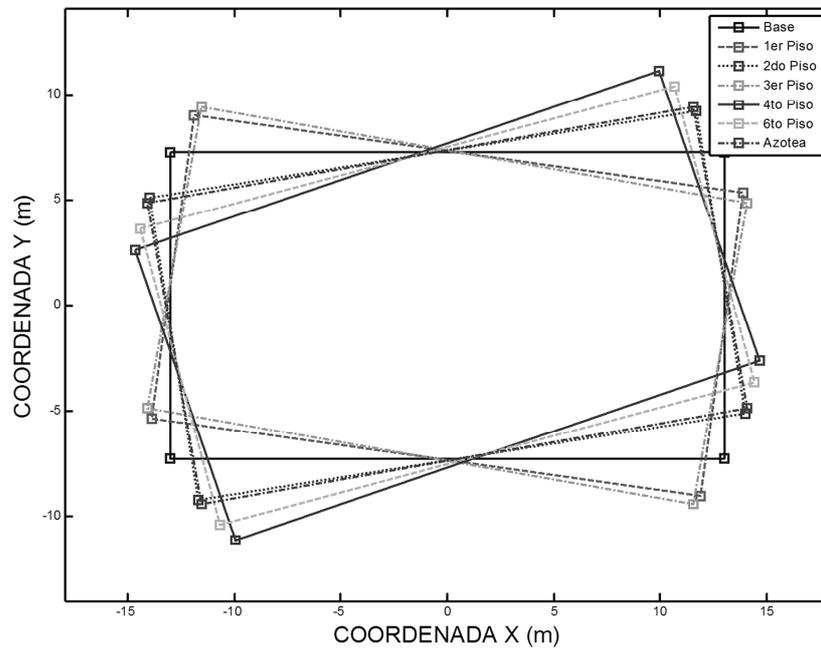


Figura B.39 Configuración 8va forma modal de torsión, obtenida por ACI