



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN
ESTANQUE DE NIVEL DE AGUA VARIABLE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ALBERTO PATRICIO ARROCHAS CONTRERAS

PROFESOR GUÍA
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF
RODRIGO ASTROZA EULUFÍ

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: ALBERTO PATRICIO ARROCHAS CONTRERAS
FECHA: JUNIO 2019
PROFESOR GUÍA: FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN ESTANQUE DE NIVEL DE AGUA VARIABLE

El presente trabajo está orientado en la implementación y validación de la técnica de análisis SMFDD (Seismic Modal Frequency Domain Decomposition) a través de pequeñas ventanas de tiempo, el cual se propone como una técnica de identificación de la variación de las propiedades dinámicas de estructuras a través del tiempo, que es especialmente útil para estructuras que presentan modos de frecuencias cercanas.

Para comprobar la fiabilidad del método, se realiza un ensayo experimental a escala de un estanque semicilíndrico que permite almacenar líquidos, el cual es vaciado durante el tiempo y excitado en su base por registros de aceleraciones en dos direcciones del tipo aleatorios independientes a través del uso de una mesa vibradora, generando como consecuencia la variación de sus frecuencias naturales a medida que este es vaciado. Además, al ser una estructura simétrica presenta modos perpendiculares con frecuencias de valores cercanos.

De esta forma, se implementa el algoritmo SMFDD (Seismic Modal Frequency Domain Decomposition) por pequeñas ventanas de tiempo en el programa Matlab, el cual es empleado para estimar la variación de las propiedades dinámicas de la estructura ensayada. La validación del método se comprueba de la alta correlación que se obtiene con la identificación realizada al usar otras técnicas de identificación aplicadas a los mismos registros y cuando el estanque contiene diversos niveles de líquido invariables en el tiempo, tales como ITD (Ibrahim Time Domain), DSI por pequeñas ventanas de tiempo (Deterministic-Stochastic Subspace Identification), Espectrograma (STFT) y tTF (función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo).

La ventaja de emplear SMFDD por pequeñas ventanas de tiempo radica en que la metodología, al usar múltiples sensores como inputs y outputs, permite desagregar y descomponer directamente la respuesta modal, identificando con mayor eficacia los modos de frecuencias similares (o idénticas), siendo de esta forma un avance en técnicas de identificación de estructuras con métodos tiempo-frecuencia. Observándose, que el método SMFDD por pequeñas ventanas permite obtener un “tTF” para cada modo en forma independiente.

Se comprobó que mediante la técnica SMFDD por pequeñas ventanas se logra definir correctamente las frecuencias fundamentales y formas modales a través del tiempo, encontrándose la existencia de dos modos perpendiculares (de frecuencias variables) que dominan el movimiento sísmico del estanque estudiado.

“Ama a tus padres, pero por sobre todas las cosas ama a Dios y a tu madre, no existe amor más puro e incondicional que el de ella”.

Alberto Arrochas, Padre.

Dedicado a mi madre y padre, por su apoyo y confianza infinita en mí.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Eva y Alberto, los principales pilares de mi vida. Su constante apoyo, preocupación y motivación facilitaron toda mi etapa como estudiante. Estuvieron conmigo siempre presentes aplaudiendo mis éxitos y levantándome en mis fracasos; son los gestores del cumplimiento de mis metas y sueños.

Agradezco a mi Pameloca, por ser una mujer extraordinaria y entregarme infinito amor. A mis grandes amigos que hicieron ameno mi paso por la universidad y la carrera: Camión, Chalito, Chung, Edutop, Ferri, Nachopop, Luchomón, Luchopai-pai-pai. A todos aquellos que compartimos grandes momentos en la U, en la pecera jugando Care-kk, en los Paseos Civiles (mi legado en el departamento) o en mi hogar en las noches de estudio, comiendo a destajo y riendo juntos. Al club de natación Smart Swim Team que me acoge a diario en los entrenamientos y que a pesar que salga destruido de la piscina cada mañana, la sonrisa de oreja a oreja por haber compartido con una excelente calidad humana no me la quita nadie.

Agradezco a los funcionarios y profesores del departamento de Ingeniería Civil que aportaron en mi formación como ingeniero y en especial a mi profesor guía de memoria, Francisco Hernández, quien es una excelente persona, dedicado, trabajador y comprometido con sus alumnos y la docencia.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 Introducción	1-1
1.1. Motivación	1-1
1.2. Estado del arte.....	1-5
1.3. Objetivos.....	1-7
1.3.1. Objetivos generales	1-7
1.3.2. Objetivos específicos	1-7
1.4. Metodología	1-9
1.4.1. Revisión bibliográfica sobre el comportamiento de estanques de almacenamiento de líquidos	1-9
1.4.2. Montaje Experimental de estructura a escala.....	1-9
1.4.3. Ensayos en laboratorio.....	1-10
1.4.3.1. Inputs y Outputs.....	1-10
1.4.4. Aplicación del Método ITD.....	1-10
1.4.5. Aplicación del Método DSI por pequeñas ventanas de tiempo.....	1-10
1.4.6. Aplicación de Espectrogramas.....	1-11
1.4.7. Aplicación del Método Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tfTF)	1-11
1.4.8. Comparación de métodos.....	1-11
1.4.9. Implementación y aplicación del método SMFDD.....	1-11
1.4.10. Determinación de parámetros dinámicos.....	1-11
1.4.11. Análisis y validación de resultados.....	1-12
Capítulo 2 Antecedentes	2-13
2.1. Método de Housner (1963): modelo dinámico de estanques.....	2-13
2.1.1. API 650 “Welded Steel tanks for oil storage”.....	2-15
2.1.1.1. Período de vibración estructural	2-16
2.1.2. ACI 350 “Seismic Design of Liquid Containing Concrete Structures”.....	2-17

2.1.2.1.	Masas equivalentes del líquido en aceleración (excluyendo la presión base).	2-19
2.1.2.2.	Alturas de los centros de gravedad (excluyendo la presión base).....	2-20
2.1.2.3.	Altura de los centros de gravedad (incluyendo la presión base).....	2-22
2.1.2.4.	Propiedades dinámicas.....	2-23
Capítulo 3 Ensayo Modal de Estructuras.....		3-26
3.1.	Etapas del Ensayo modal	3-27
3.1.1.	Montaje del sistema experimental.....	3-27
3.1.2.	Adquisición de datos y estimación de las funciones de respuesta en frecuencia (FRF)	3-27
3.1.3.	Identificación de los parámetros dinámicos mediante Análisis Modal.....	3-28
3.1.4.	Validación de resultados	3-28
3.2.	Métodos de Análisis Modal.....	3-28
Capítulo 4 Métodos de análisis modal.....		4-31
4.1.	Método de identificación de Ibrahim en el dominio del tiempo (ITD).....	4-31
4.1.1.	Descripción del método ITD utilizado.....	4-31
4.2.	Método de Identificación Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI)	4-37
4.2.1.	Descripción del método DSI utilizado.....	4-37
4.2.2.	Criterios de estabilidad en la estimación de las propiedades dinámicas	4-40
4.2.3.	Propiedades dinámicas invariantes y variantes en el tiempo	4-42
4.2.3.1.	Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo.....	4-42
4.2.3.2.	Propiedades dinámicas variantes en el tiempo.....	4-43
4.2.4.	Largo de ventana de tiempo.....	4-44
4.3.	Métodos de Identificación en Tiempo-Frecuencia	4-45
4.3.1.	Espectrograma	4-45
4.3.2.	Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tfTF).....	4-47
4.4.	Método de identificación a través de la descomposición en el dominio de la frecuencia para el caso sísmico (SMFDD).....	4-49

4.4.1.	Descripción del método Frequency Domain Decomposition para el caso sísmico (SMFDD).....	4-49
Capítulo 5 Ensayos en Laboratorio		5-59
5.1.	Descripción de Estructura	5-59
5.1.1.	Sistema principal	5-59
5.1.2.	Sistema secundario.....	5-62
5.1.2.1.	Elementos del sistema de almacenamiento	5-62
5.1.2.2.	Elementos del sistema de restitución.....	5-62
5.2.	Montaje en Laboratorio	5-65
5.2.1.	Elementos de medición.....	5-65
5.2.1.1.	Acelerómetros	5-65
5.2.1.2.	Sensores Ultrasónicos.....	5-66
5.2.1.3.	Medidor de agua potable domiciliario	5-67
5.2.2.	Sistema de adquisición de datos.....	5-68
5.2.2.1.	Convertidor analógico digital (ADC)	5-70
5.2.3.	Cámaras de video.....	5-70
5.2.4.	Equipo secundario.....	5-71
5.2.5.	Disposición de sensores	5-72
5.2.5.1.	Configuración A de sensores.....	5-73
5.2.5.2.	Configuración B de sensores.....	5-75
5.3.	Generación de registros de señales aleatorias	5-77
5.3.1.	Registro aleatorio suave.....	5-77
5.3.1.1.	Teórico.....	5-77
5.3.1.2.	Experimental	5-80
5.3.2.	Registro aleatorio fuerte.....	5-85
5.3.2.1.	Teórico.....	5-85
5.3.2.2.	Experimental	5-88
5.4.	Metodología de Ensayos experimentales.....	5-93
5.4.1.	Ensayos preliminares.....	5-93
5.4.2.	Ensayo de impacto.....	5-94
5.4.3.	Ensayos con excitación basal.....	5-94

5.4.3.1.	Sismo aleatorio en dos direcciones.....	5-95
5.4.3.2.	Sismos de Concepción al 55% y Constitución al 50%	5-95
5.4.3.3.	Sismo aleatorio en una dirección.....	5-96
5.4.4.	Matrices de ensayo.....	5-96

Capítulo 6 Identificación de propiedades dinámicas mediante métodos de Análisis Modal.....6-99

6.1. Identificación de propiedades dinámicas a partir de ensayos de impacto a través del método de Ibrahim en el dominio del tiempo (ITD)..... 6-100

6.1.1.	Registro de respuesta de aceleración a08pullback735.....	6-101
6.1.2.	Registro de respuesta de aceleración b07pullback601	6-104
6.1.3.	Resumen y análisis de resultados, método ITD	6-107
6.1.3.1.	Análisis de las formas modales perpendiculares.....	6-110

6.2. Método de Identificación Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI) 6-113

6.2.1.	Identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo	6-113
6.2.1.1.	Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS694, altura de agua h_{inicial} = 60,3 cm	6-114
6.2.1.2.	Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS696, altura de agua h_{inicial} = 69,4 cm	6-119
6.2.2.	Identificación de propiedades dinámicas para estanque con nivel de agua invariante en el tiempo	6-124
6.2.2.1.	Altura de agua constante h = 0 cm , excitación basal AS692	6-125
6.2.2.2.	Altura de agua constante h = 73,5 cm , excitación basal AS692.....	6-130
6.2.3.	Resumen y análisis de resultados, método DSI.....	6-135

6.3. Métodos de identificación tiempo-frecuencia: Espectrograma y Función de Transferencia por pequeñas ventanas (tfTF)..... 6-137

6.3.1.	Nivel de altura de agua variable	6-137
6.3.1.1.	Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS694, altura de agua h_{inicial} = 60,3 cm	6-138
6.3.1.2.	Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS696, altura de agua h_{inicial} = 69,4 cm	6-140
6.3.2.	Nivel de altura de agua constante.....	6-141

6.3.2.1.	Altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, excitación basal AS692	6-142
6.3.2.2.	Altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, excitación basal AS692.....	6-143
6.4.	Método de identificación a través de la descomposición en el dominio de la frecuencia para el caso con excitación basal (SMFDD)	6-144
6.4.1.	Nivel de altura de agua variable	6-144
6.4.1.1.	Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS692, altura de agua h inicial = 73,1 cm	6-144
6.4.1.2.	Vaciado de estanque sometido a excitación basal AF691, altura de agua h inicial = 62,3 cm	6-149
6.4.2.	Resumen y análisis de resultados, método SMFDD.....	6-154
6.5.	Resumen general y validación del método SMFDD	6-156
Capítulo 7 Conclusiones y comentarios		7-162
Capítulo 8 Bibliografía.....		8-165
Capítulo 9 Anexos		9-168
9.1.	Anexo A: Datos experimentales.....	9-168
9.2.	Anexo B: Mesa vibradora (Moog Inc., 2008).....	9-173
9.3.	Anexo C: Normas de diseño sísmico de estanques de almacenamiento..	9-179
9.4.	Anexo D: Cálculo de período convectivo e impulsivo mediante método de Housner y Normas	9-182
9.5.	Anexo E: Identificación de propiedades dinámicas mediante métodos de identificación de sistemas	9-189

Índice de Tablas

Tabla 5.1. Especificaciones estructura principal.	5-59
Tabla 5.2. Masa de elementos del estanque principal	5-61
Tabla 5.3. Datos técnicos Acelerómetros KISTLER.	5-66
Tabla 5.4. Datos técnicos Ultrasónicos BANNER ENGINEERING.	5-67
Tabla 5.5. Especificaciones técnicas medidor de agua DN 19 mm (3/4").	5-68
Tabla 5.6. Características cámaras de video.....	5-70
Tabla 5.7. Especificaciones técnicas Bomba recirculadora	5-72
Tabla 5.8. Configuración A de sensores en estanque principal.....	5-73
Tabla 5.9. Configuración B de sensores en estanque principal.....	5-75
Tabla 5.10. Datos registro de aceleraciones aleatorias suaves.	5-77
Tabla 5.11. Parámetros de aceleraciones experimentales basales, registro a01vacio000.....	5-81
Tabla 5.12. Datos registro de aceleraciones aleatorias fuertes.....	5-85
Tabla 5.13. Parámetros de aceleraciones experimentales basales, registro a02vacio000.....	5-88
Tabla 5.14. Datos zonas de impactos.....	5-94
Tabla 5.15. Datos registros sísmicos aleatorios en dos direcciones.	5-95
Tabla 5.16. Datos registros sísmicos en tres direcciones.....	5-96
Tabla 5.17. Datos registros sísmicos aleatorios en una dirección.....	5-96
Tabla 5.18. Matriz de ensayo 1, configuración A de sensores.....	5-97
Tabla 5.19. Matriz de ensayo 2, configuración B de sensores.....	5-98
Tabla 6.1. Resumen de Frecuencias y razones de amortiguamientos promedio de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque, configuración A y B de sensores.....	6-108
Tabla 6.2. Movimiento de la circunferencia de aproximación de cada modo.....	6-110
Tabla 6.3. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, análisis de registro b12vaciado603.	6-114
Tabla 6.4. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 60,3 cm, registro b12vaciado603.....	6-116
Tabla 6.5. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, análisis de registro b13vaciado694.	6-119
Tabla 6.6. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 69,4 cm, registro b13vaciado694.....	6-121
Tabla 6.7. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, análisis de registro a01vacio000.	6-125
Tabla 6.8. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante <i>h</i> = 0 cm, registro a01vacio000. ...	6-127

Tabla 6.9. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, análisis de registro a09suave735.....	6-130
Tabla 6.10. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735....	6-132
Tabla 6.11. Frecuencias de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque.....	6-136
Tabla 6.12. Parámetros necesarios para la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.....	6-145
Tabla 6.13. Parámetros necesarios para la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.....	6-149
Tabla 6.14. Frecuencias de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque.....	6-155
Tabla 9.1. Lectura de huincha métrica, cálculo de altura de ola y el parámetro d	9-169
Tabla 9.2. Relación de la altura de agua y su tiempo correspondiente, obtenida experimentalmente.	9-171
Tabla 9.3. Valores límites de movimiento de la mesa vibradora.....	9-178
Tabla 9.4. Cálculo de los parámetros del modelo mecánico de Housner.....	9-182
Tabla 9.5. Espectro elástico de desplazamiento, excitación basal AS692.....	9-183
Tabla 9.6. Espectro elástico de desplazamiento, excitación basal AF691.....	9-183
Tabla 9.7. Altura de cresta de ola d , excitación basal AS692.....	9-183
Tabla 9.8. Altura de cresta de ola d , excitación basal AF691.....	9-184
Tabla 9.9. Comparación del parámetro d entre método de Housner y resultados experimentales.	9-184
Tabla 9.10. Parámetros dinámicos obtenidos con la norma API 650.....	9-187
Tabla 9.11. Altura de agua $h = 13,7 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a13pullback137.....	9-190
Tabla 9.12. Altura de agua $h = 13,7 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a13pullback137.....	9-190
Tabla 9.13. Altura de agua $h = 13,7 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a13pullback137.....	9-190
Tabla 9.14. Altura de agua $h = 23,0 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a15pullback230.....	9-191
Tabla 9.15. Altura de agua $h = 23,0 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a15pullback230.....	9-191
Tabla 9.16. Altura de agua $h = 23,0 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a15pullback230.....	9-191
Tabla 9.17. Altura de agua $h = 33,8 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a16pullback338.....	9-192
Tabla 9.18. Altura de agua $h = 33,8 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a16pullback338.....	9-192
Tabla 9.19. Altura de agua $h = 33,8 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a16pullback338.....	9-192
Tabla 9.20. Altura de agua $h = 46,0 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a17pullback460.....	9-193
Tabla 9.21. Altura de agua $h = 46,0 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a17pullback460.....	9-193
Tabla 9.22. Altura de agua $h = 46,0 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a17pullback460.....	9-193
Tabla 9.23. Altura de agua $h = 55,9 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a19pullback559.....	9-194
Tabla 9.24. Altura de agua $h = 55,9 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a19pullback559.....	9-194
Tabla 9.25. Altura de agua $h = 55,9 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a19pullback559.....	9-194
Tabla 9.26. Altura de agua $h = 62,3 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a20pullback623.....	9-195

Tabla 9.27. Altura de agua $h = 62,3 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a20pullback623.	9-195
Tabla 9.28. Altura de agua $h = 62,3 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a20pullback623.	9-195
Tabla 9.29. Altura de agua $h = 73,1 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a11pullback731.	9-196
Tabla 9.30. Altura de agua $h = 73,1 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a11pullback731.	9-196
Tabla 9.31. Altura de agua $h = 73,1 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a11pullback731.	9-196
Tabla 9.32. Altura de agua $h = 73,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a08pullback735.	9-197
Tabla 9.33. Altura de agua $h = 73,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a08pullback735.	9-197
Tabla 9.34. Altura de agua $h = 73,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a08pullback735.	9-197
Tabla 9.35. Altura de agua $h = 0 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b01pullback000.....	9-198
Tabla 9.36. Altura de agua $h = 0 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b01pullback000.....	9-198
Tabla 9.37. Altura de agua $h = 0 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b01pullback000.....	9-198
Tabla 9.38. Altura de agua $h = 10,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b02pullback105.	9-199
Tabla 9.39. Altura de agua $h = 10,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b02pullback105.	9-199
Tabla 9.40. Altura de agua $h = 10,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b02pullback105.	9-199
Tabla 9.41. Altura de agua $h = 20,2 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b03pullback202.	9-200
Tabla 9.42. Altura de agua $h = 20,2 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b03pullback202.	9-200
Tabla 9.43. Altura de agua $h = 20,2 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b03pullback202.	9-200
Tabla 9.44. Altura de agua $h = 31,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b04pullback315.	9-201
Tabla 9.45. Altura de agua $h = 31,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b04pullback315.	9-201
Tabla 9.46. Altura de agua $h = 31,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b04pullback315.	9-201
Tabla 9.47. Altura de agua $h = 40,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b05pullback405.	9-202
Tabla 9.48. Altura de agua $h = 40,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b05pullback405.	9-202
Tabla 9.49. Altura de agua $h = 40,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b05pullback405.	9-202
Tabla 9.50. Altura de agua $h = 50,3 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b06pullback503.	9-203
Tabla 9.51. Altura de agua $h = 50,3 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b06pullback503.	9-203
Tabla 9.52. Altura de agua $h = 50,3 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b06pullback503.	9-203
Tabla 9.53. Altura de agua $h = 60,1 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b07pullback601.	9-204
Tabla 9.54. Altura de agua $h = 60,1 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b07pullback601.	9-204
Tabla 9.55. Altura de agua $h = 60,1 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b07pullback601.	9-204
Tabla 9.56. Altura de agua $h = 68,3 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b08pullback683.	9-205
Tabla 9.57. Altura de agua $h = 68,3 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b08pullback683.	9-205
Tabla 9.58. Altura de agua $h = 68,3 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b08pullback683.	9-205
Tabla 9.59. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 80,3 cm, sin sismo, registro b11vaciado803.....	9-207
Tabla 9.60. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 80,3 cm, sin sismo, registro b11vaciado803.	9-209
Tabla 9.61. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 62,3 cm, sismo AF691, registro a21vaciado623.	9-211
Tabla 9.62. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 62,3 cm, sismo AF691, registro a21vaciado623.....	9-214

Tabla 9.63. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 60,1 cm, sismo AF693, registro b14vaciado601.....	9-216
Tabla 9.64. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 60,1 cm, sismo AF693, registro b14vaciado601.....	9-219
Tabla 9.65. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 67,2 cm, sismo AF695, registro b15vaciado672.....	9-221
Tabla 9.66. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 67,2 cm, sismo AF695, registro b15vaciado672.....	9-224
Tabla 9.67. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 0 cm, sismo AF691, registro a02vacio691.....	9-226
Tabla 9.68. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 0 cm, sismo AF691, registro a02vacio691.....	9-229
Tabla 9.69. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 13,7 cm, sismo AS692, registro a14suave137.....	9-231
Tabla 9.70. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 13,7 cm, sismo AS692, registro a14suave137.....	9-234
Tabla 9.71. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 45,7 cm, sismo CONS., registro a22constitucion457.....	9-236
Tabla 9.72. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 45,7 cm, sismo CONS., registro a22constitucion457.....	9-239
Tabla 9.73. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 46,0 cm, sismo AS692, registro a18suave460.....	9-241
Tabla 9.74. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 46,0 cm, sismo AS692, registro a18suave460.....	9-244
Tabla 9.75. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 59,0 cm, sismo AS692, registro a04suave590.....	9-246
Tabla 9.76. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante <i>h</i> = 59,0 cm, sismo AS692, registro a04suave590.....	9-249
Tabla 9.77. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro a12vaciado731.	9-251
Tabla 9.78. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro a21vaciado623.	9-251
Tabla 9.79. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b12vaciado603.	9-252
Tabla 9.80. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b13vaciado694.	9-252
Tabla 9.81. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b14vaciado601.	9-253
Tabla 9.82. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b15vaciado672.	9-253
Tabla 9.83. Identificación de frecuencias naturales del Modo 1.....	9-259
Tabla 9.84. Identificación de frecuencias naturales del Modo 2.....	9-259

Tabla 9.85. Identificación de frecuencias naturales del Modo 3.....	9-260
Tabla 9.86. Identificación de frecuencias naturales del Modo 4.....	9-260
Tabla 9.87. Identificación de frecuencias naturales del Modo 5.....	9-260
Tabla 9.88. Identificación de frecuencias naturales del Modo 6.....	9-261

Índice de Figuras

Figura 2.1. Sistema dinámico de Housner equivalente para un estanque de agua. Fuente: (Housner, 1963).....	2-13
Figura 2.2. Relación H/D para el cálculo de C_i . Fuente: (American Petroleum Institute, 2007).	2-16
Figura 2.3. Modelo dinámico líquido-contenido en estanque rígido apoyado en el suelo.....	2-18
Figura 2.4. Factores W_i/W_L y W_c/W_L versus razón D/H_L para estanques circulares. Fuente: (American Concrete Institute, 2001).	2-20
Figura 2.5. Factores h_i/H_L y h_c/H_L versus razón D/H_L para estanques circulares (EBP). Fuente: (American Concrete Institute, 2001).	2-21
Figura 2.6. Factores h_i'/H_L y h_c'/H_L versus razón D/H_L para estanques circulares (IBP). Fuente: (American Concrete Institute, 2001).	2-23
Figura 2.7. Coeficiente C_w para estanques circulares. Fuente: (American Concrete Institute, 2001).....	2-25
Figura 2.8. Factor $2\pi/\lambda$ para estanque circulares. Fuente: (American Concrete Institute, 2001).	2-25
Figura 3.1. Tipos de Ensayo Modal. Fuente: (Castro T., 2016).....	3-27
Figura 3.2. Dominio del tiempo y la frecuencia.	3-29
Figura 3.3. Esquema de los Métodos de Análisis Modal. Fuente: (Castro T., 2016).....	3-30
Figura 4.1. Representación gráfica del modelo espacio-estado en tiempo discreto, considerando un sistema lineal invariante en el tiempo. Fuente: (Van Overschee, P. & De Moor, 1996).	4-38
Figura 4.2. Ejemplo de diagrama de estabilidad donde se presentan resultados del método DSI.	4-42
Figura 4.3. Gráfico 3D de Espectrograma. Fuente: (F. J. Hernández, 2009).....	4-46
Figura 4.4. Espectrograma de tonalidades en el espacio tiempo-frecuencia.....	4-46
Figura 4.5. Función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tfTF), gráfico de tonalidades en el espacio tiempo-frecuencia.....	4-48
Figura 5.1. Estanque principal.	5-60
Figura 5.2. Abrazadera de acero “a la medida” apernada en placa base.	5-60
Figura 5.3. Tapa de acrílico e interior de Estanque principal.	5-61
Figura 5.4. Válvula de salida de estanque principal.....	5-62
Figura 5.5. Estanque principal y sistema de almacenamiento y restitución.....	5-63
Figura 5.6. Estanque secundario de almacenamiento.....	5-64
Figura 5.7. Válvula de entrada y medidor de agua B, sistema de restitución.....	5-64
Figura 5.8. Acelerómetro KISTLER 8310A K-BEAM.	5-65
Figura 5.9. Sensor Ultrasónico S18UUAQ BANNER ENGINEERING.....	5-67
Figura 5.10. Medidor de agua potable domiciliario INVENSYS. Fuente: (Invensys, n.d.).	5-68

Figura 5.11. Esquema del Sistema de Adquisición de datos (DAQ).....	5-69
Figura 5.12. Dispositivos de adquisición de datos.....	5-69
Figura 5.13. Computador Sistema en cual se encuentra la tarjeta de adquisición de datos.....	5-69
Figura 5.14. Posiciones cámaras de video GoPro.....	5-71
Figura 5.15. Bomba recirculadora Grundfos. Fuente: (Sodimac S.A., 2018).	5-71
Figura 5.16. Acelerómetros instalados en placa base de madera.	5-72
Figura 5.17. Configuración A de sensores, vista en planta h=85 cm.....	5-74
Figura 5.18. Configuración A de sensores, vista en elevación.....	5-74
Figura 5.19. Configuración B de sensores, vista en planta h=45 cm.....	5-76
Figura 5.20. Registro de aceleraciones aleatorias suaves para cada eje.	5-78
Figura 5.21. Espectro de potencia del registro aleatorio suave para los ejes X e Y.	5-78
Figura 5.22. Registro de aceleraciones aleatorias suaves, velocidad y desplazamiento en eje X.....	5-79
.....	5-79
Figura 5.23. Registro de aceleraciones aleatorias suaves, velocidad y desplazamiento en eje Y.....	5-79
.....	5-79
Figura 5.24. Aceleraciones basales medidas experimentalmente en X e Y, acelerómetros A12 y A11, respectivamente, registro a01vacio000.	5-80
Figura 5.25. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A12 y A6, respectivamente, registro a01vacio000.	5-81
Figura 5.26. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje Y, acelerómetros A11 y A3, respectivamente, registro a01vacio000.	5-82
Figura 5.27. Función de Transferencia, señal teórica vs acelerómetro A12, registro a01vacio000... ..	5-83
.....	5-83
Figura 5.28. Función de Transferencia, señal teórica vs acelerómetro A11, registro a01vacio000... ..	5-83
.....	5-83
Figura 5.29. Registro de aceleraciones aleatorias fuertes para cada eje.	5-86
Figura 5.30. Espectro de potencia del registro aleatorio fuerte para los ejes X e Y.....	5-86
Figura 5.31. Registro de aceleraciones aleatorias fuertes, velocidad y desplazamiento en eje X.....	5-87
.....	5-87
Figura 5.32. Registro de aceleraciones aleatorias fuertes, velocidad y desplazamiento en eje Y.....	5-87
.....	5-87
Figura 5.33. Aceleraciones basales medidas experimentalmente en X e Y, acelerómetros A12 y A11, respectivamente, registro a02vacio000.	5-88
Figura 5.34. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A12 y A6, respectivamente, registro a02vacio000.	5-89
Figura 5.35. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A11 y A3, respectivamente, registro a02vacio000.	5-89
Figura 5.36. Función de Transferencia, señal teórica vs acelerómetro A12, registro a02vacio000... ..	5-90
.....	5-90
Figura 5.37. Función de Transferencia, señal teórica vs acelerómetro A11, registro a02vacio000... ..	5-91
.....	5-91
Figura 5.38. Esquema de zonas de golpes de los ensayos de impacto.	5-94
Figura 6.1. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 1, configuración A de sensores.	6-101

Figura 6.2. Formas modales, 1° impacto en la zona 1, configuración A de sensores.	6-101
Figura 6.3. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 2, configuración A de sensores.	6-102
Figura 6.4. Formas modales, 1° impacto en la zona 2, configuración A de sensores.	6-102
Figura 6.5. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 3, configuración A de sensores.	6-103
Figura 6.6. Formas modales, 1° impacto en la zona 3, configuración A de sensores.	6-103
Figura 6.7. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 1, configuración B de sensores.	6-104
Figura 6.8. Formas modales, 1° impacto en la zona 1, configuración B de sensores.	6-104
Figura 6.9. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 2, configuración B de sensores.	6-105
Figura 6.10. Formas modales, 1° impacto en la zona 2, configuración B de sensores.	6-105
Figura 6.11. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 3, configuración B de sensores.	6-106
Figura 6.12. Formas modales, 1° impacto en la zona 3, configuración B de sensores.	6-106
Figura 6.13. Variación de frecuencia de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque.....	6-109
Figura 6.14. Variación de frecuencia de cada modo identificado con respecto al tiempo (asociada a ensayo n° 12 configuración A de sensores).....	6-109
Figura 6.15. Forma modal del modo 1 (ensayo n°7 configuración B de sensores, b07pullback601).	6-111
Figura 6.16. Forma modal del modo 2 (ensayo n°7 configuración B de sensores, b07pullback601).	6-111
Figura 6.17. MAC entre las primeras 6 formas modales identificadas de la estructura, configuración A de sensores, registro a11pullback731.....	6-112
Figura 6.18. MAC entre las primeras 6 formas modales identificadas de la estructura, configuración B de sensores, registro b07pullback601.....	6-112
Figura 6.19. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 60,3 cm, registro b12vaciado603.....	6-115
Figura 6.20. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 60,3 cm, registro b12vaciado603.....	6-115
Figura 6.21. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 60,3 cm, registro b12vaciado603.....	6-116
Figura 6.22. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 60,3 cm, registro b12vaciado603.....	6-117
Figura 6.23. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 60,3 cm, registro b12vaciado603.....	6-118
Figura 6.24. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 69,4 cm, registro b13vaciado694.....	6-120
Figura 6.25. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 69,4 cm, registro b13vaciado694.....	6-120
Figura 6.26. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 69,4 cm, registro b13vaciado694.....	6-121
Figura 6.27. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 69,4 cm, registro b13vaciado694.....	6-122
Figura 6.28. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 69,4 cm, registro b13vaciado694.....	6-123

Figura 6.29. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.....	6-126
Figura 6.30. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.....	6-126
Figura 6.31. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.....	6-127
Figura 6.32. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.....	6-128
Figura 6.33. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.....	6-129
Figura 6.34. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.....	6-131
Figura 6.35. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.....	6-131
Figura 6.36. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.....	6-132
Figura 6.37. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.....	6-133
Figura 6.38. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.....	6-134
Figura 6.39. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A4, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.....	6-138
Figura 6.40. Superposición de los métodos Espectrograma, ITD y DSI. Excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.....	6-138
Figura 6.41. tfTF, análisis en la dirección eje X, output A4 e input A12, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.....	6-139
Figura 6.42. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A7, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.....	6-140
Figura 6.43. Superposición de los métodos Espectrograma, ITD y DSI. Excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.....	6-140
Figura 6.44. tfTF, análisis en la dirección eje Y, output A7 e input A11, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.....	6-141
Figura 6.45. Espectrograma, output A5, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.....	6-142
Figura 6.46. tfTF, output A5 e input A6, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.....	6-142
Figura 6.47. Espectrograma, output A5, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.....	6-143
Figura 6.48. tfTF, output A5 e input A6, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.....	6-143
Figura 6.49. Valores singulares por pequeñas ventanas asociados a cada input. Ventanas #1, #150, #275, respectivamente. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.....	6-145

Figura 6.50. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 1. Ventanas #1, #150, #275, respectivamente. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 73,1 cm, registro a12vaciado731.	6-146
Figura 6.51. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 2. Ventanas #1, #150, #275, respectivamente. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 73,1 cm, registro a12vaciado731.	6-146
Figura 6.52. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 1. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 73,1 cm, registro a12vaciado731.	6-147
Figura 6.53. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 2 del input 1. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 73,1 cm, registro a12vaciado731.	6-147
Figura 6.54. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 2. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 73,1 cm, registro a12vaciado731.	6-148
Figura 6.55. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 2 del input 2. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 73,1 cm, registro a12vaciado731.	6-148
Figura 6.56. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 3 del input 2. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 73,1 cm, registro a12vaciado731.	6-149
Figura 6.57. Valores singulares por pequeñas ventanas asociada a cada input. Ventanas #1, #100, #207, respectivamente. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 62,3 cm, registro a21vaciado623.	6-150
Figura 6.58. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 1. Ventanas #1, #100, #207, respectivamente. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 62,3 cm, registro a21vaciado623.	6-151
Figura 6.59. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 2. Ventanas #1, #100, #207, respectivamente. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 62,3 cm, registro a21vaciado623.	6-151
Figura 6.60. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 1. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 62,3 cm, registro a21vaciado623.	6-152
Figura 6.61. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 2 del input 1. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 62,3 cm, registro a21vaciado623.	6-152
Figura 6.62. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 2. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua <i>hinicial</i> = 62,3 cm, registro a21vaciado623.	6-153
Figura 6.63. Variación de frecuencia del Modo 1, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.	6-156
Figura 6.64. Forma modal identificada Modo 1.....	6-156

Figura 6.65. Variación de frecuencia del Modo 2, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.	6-157
Figura 6.66. Forma modal identificada Modo 2.....	6-157
Figura 6.67. Variación de frecuencia del Modo 3, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.	6-158
Figura 6.68. Forma modal identificada Modo 3.....	6-158
Figura 6.69. Variación de frecuencia del Modo 4, resultados de los métodos ITD y DSI.....	6-159
Figura 6.70. Forma modal identificada Modo 4.....	6-159
Figura 6.71. Variación de frecuencia del Modo 5, resultados de los métodos ITD y DSI.....	6-160
Figura 6.72. Forma modal identificada Modo 5.....	6-160
Figura 6.73. Variación de frecuencia del Modo 6, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.	6-161
Figura 6.74. Forma modal identificada Modo 6.....	6-161
Figura 9.1. Captura extraída del video grabado por la cámara GP1, dirección 30° con respecto al eje X.	9-168
Figura 9.2. Captura extraída del video grabado por la cámara GP2, dirección 150° con respecto al eje X.	9-169
Figura 9.3. Captura extraída del video grabado por la cámara GP3, dirección 270° con respecto al eje X.	9-169
Figura 9.4. Lectura máxima de ola en huincha métrica (11 cm), registro AS692, $hi = 59\text{ cm}$	9-170
Figura 9.5. Lectura máxima de ola en huincha métrica (-5 cm), registro AF691, $hi = 59\text{ cm}$	9-170
Figura 9.6. Lecturas de volúmenes asociadas a alturas de agua determinadas al interior del estanque principal y su correspondiente medición del tiempo.....	9-172
Figura 9.7. Mesa vibradora. Moog 6DOF200E Motion System. Fuente: (Moog Inc., 2008). ..	9-174
Figura 9.8. Ejes cartesianos mesa vibradora.....	9-175
Figura 9.9. Mesa vibradora en laboratorio.....	9-176
Figura 9.10. Display de información en pantalla.....	9-178
Figura 9.11. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AS692, dirección X.....	9-185
Figura 9.12. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AS692, dirección Y.....	9-185
Figura 9.13. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AF691, dirección X.....	9-186
Figura 9.14. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AF691, dirección Y.....	9-186
Figura 9.15. Frecuencias identificadas en función de la altura de agua asociadas al modo convectivo y al modo impulsivo.....	9-188
Figura 9.16. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3\text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.....	9-208
Figura 9.17. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3\text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.....	9-208
Figura 9.18. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3\text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.....	9-209
Figura 9.19. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3\text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.....	9-210

Figura 9.20. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.....	9-212
Figura 9.21. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.....	9-212
Figura 9.22. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.....	9-213
Figura 9.23. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.....	9-214
Figura 9.24. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.....	9-215
Figura 9.25. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.....	9-217
Figura 9.26. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.....	9-217
Figura 9.27. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.....	9-218
Figura 9.28. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.....	9-219
Figura 9.29. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.....	9-220
Figura 9.30. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.....	9-222
Figura 9.31. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.....	9-222
Figura 9.32. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.....	9-223
Figura 9.33. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.....	9-224
Figura 9.34. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.....	9-225
Figura 9.35. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.....	9-227
Figura 9.36. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.....	9-227
Figura 9.37. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.....	9-228
Figura 9.38. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.....	9-229
Figura 9.39. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.....	9-230
Figura 9.40. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.....	9-232

Figura 9.41. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.....	9-232
Figura 9.42. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.....	9-233
Figura 9.43. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.....	9-234
Figura 9.44. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.....	9-235
Figura 9.45. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.....	9-237
Figura 9.46. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.....	9-237
Figura 9.47. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.....	9-238
Figura 9.48. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.....	9-239
Figura 9.49. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.....	9-240
Figura 9.50. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.....	9-242
Figura 9.51. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.....	9-242
Figura 9.52. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.....	9-243
Figura 9.53. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.....	9-244
Figura 9.54. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.....	9-245
Figura 9.55. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.....	9-247
Figura 9.56. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.....	9-247
Figura 9.57. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.....	9-248
Figura 9.58. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.....	9-249
Figura 9.59. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.....	9-250
Figura 9.60. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A4, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.....	9-254
Figura 9.61. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A7, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.....	9-254

Figura 9.62. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A5, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 62,3 cm, sismo AF691, registro a21vaciado623.	9-255
Figura 9.63. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje X, output A5 e input A6, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 62,3 cm , sismo AF691, registro a21vaciado623.	9-256
Figura 9.64. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A9, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 62,3 cm, sismo AF691, registro a21vaciado623.	9-256
Figura 9.65. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje Y, output A9 e input A3, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 62,3 cm , sismo AF691, registro a21vaciado623.	9-256
Figura 9.66. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A4, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 60,1 cm, sismo AF693, registro b14vaciado601.	9-257
Figura 9.67. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje X, output A4 e input A12, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 60,1 cm , sismo AF693, registro b14vaciado601.	9-257
Figura 9.68. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A7, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 67,2 cm, sismo AF695, registro b15vaciado672.	9-258
Figura 9.69. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje Y, output A7 e input A11, vaciado de estanque desde <i>hinicial</i> = 67,2 cm , sismo AF695, registro b15vaciado672.	9-258

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El análisis dinámico de estructuras depende de varios parámetros que tienen un alto nivel de incertidumbre, como son por ejemplo las razones de amortiguamiento asociadas a cada modo. En este sentido los modelos que se realizan para un análisis dinámico pueden presentar diferencias significativas respecto a lo que sucede en la realidad. Por lo tanto, es necesario entender y monitorear el comportamiento de estructuras reales de manera de generar modelos más confiables que permitan modelar la respuesta real de estructuras sujetas a acciones dinámicas como sismos.

Gracias a los avances tecnológicos en tópicos relacionados a identificación de sistemas, se puede realizar una identificación de los parámetros modales de una estructura a partir de datos experimentales (Ewins, 2000). De esta forma, se pueden identificar propiedades dinámicas de la estructura como las frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento a partir de mediciones. Los métodos de identificación modal se dividen en dos categorías principales: métodos en el dominio de la frecuencia y métodos en el dominio del tiempo.

La transformada discreta de Fourier se usa a menudo en los métodos del dominio de la frecuencia y los parámetros modales de la estructura se identifican de las frecuencias predominantes del movimiento de los registros medidos. Por otro lado, el análisis en el dominio del tiempo trabaja con las señales temporales y realiza ajustes de modelos para ajustar los registros tiempo-historia.

En el caso en que se mida la respuesta, los métodos del dominio de la frecuencia se basan normalmente en funciones de densidades espectrales de potencia. Por otro lado, los métodos en el dominio del tiempo a menudo se basan en las funciones de respuesta a impulsos (esto supone un ensayo modal tradicional donde se conoce la entrada), respuesta de decaimiento libre, o métodos donde se usan decaimientos encontrados por algún tipo de procesamiento de señales como funciones de decremento aleatorio o funciones de correlación (Aguilar, Boroschek, & Massone, 2012).

Existen tres formas principales de llevar a cabo ensayos en estructuras: 1) a partir de acciones operacionales, 2) a partir de una perturbación inicial o 3) a partir de una forzante inducida (que es generada u observada). El ensayo bajo acciones operacionales se basa en la medición de la respuesta de la estructura generada por acciones que son generalmente desconocidas que se producen debido a ruido ambiental como fuente de excitación y las acciones de servicio que actúan sobre la misma (que pueden ser de una índole aleatorias o asociadas a efectos estacionarios definido por acciones de frecuencias predominantes como el efecto de equipos vibratorios). Por otra parte, ensayos relacionados a perturbaciones iniciales llamados del tipo pull-back generan un desplazamiento (o velocidad o impacto) inicial en la estructura y se observa la respuesta de decaimiento libre. En cambio, la identificación realizada a partir de forzantes observadas, los parámetros modales se obtienen de las funciones de respuesta en frecuencia (FRFs), que relacionan las respuestas medidas de la estructura (salida) con una excitación inducida (entrada), para este tipo de análisis es necesario conocer la entrada y la salida del sistema.

Es así entonces, como un ensayo modal puede ser aplicado a casi cualquier estructura que se desee conocer sus parámetros modales utilizando el método adecuado de identificación.

En el caso que las estructuras se comportan en forma no-lineal, existen varios métodos tiempo-frecuencia como el espectrograma (o STFT Short Time Fourier Transform) (WVD, wavelet, etc.) que permiten estudiar la evolución del contenido de frecuencia de una señal durante el tiempo. En este contexto, este tipo de representación tiempo-frecuencia es útil para visualizar como cambian las frecuencias fundamentales de una estructura a través del tiempo. Sin embargo, estas representaciones tiempo-frecuencia tienen desventajas como que al ser computadas de un único canal de salida tienen el inconveniente que no pueden separar el contenido asociado a modos de frecuencias cercanas (se mezclan las componentes). Además, tienen la limitación que al tratarse de la representación de respuestas totales medidas (como la aceleración) se tiene que las características dependen fuertemente de la entrada sísmica de la estructura cambiando la amplitud y el contenido de frecuencia con la potencia del input. Es decir, si la entrada tiene una frecuencia característica (no estacionaria) esta no puede ser desagregada y puede ser confundida con una característica de la estructura.

Por otra parte existen técnicas como la función de transferencia por pequeñas ventanas (STTF Short Time Transfer Function) que toman la relación espectral entre una única salida y una única entrada permitiendo eliminar en parte el efecto de la entrada sísmica (i.e., se relaciona solo a la función de transferencia entre la entrada a la salida que se asocia directamente a la estructura). Sin embargo, en caso de existir modos de frecuencias cercanas no es posible desagregar la influencia de cada modo en el caso SISO (Single Input Single Output).

Por otra parte, existen técnicas de identificación como DSI (Van Overschee, P. & De Moor, 1996) por pequeñas ventanas de tiempo que toma el efecto de varias entradas y salidas simultáneas que permitirían determinar la evolución de las propiedades dinámicas de una estructura incluso si la estructura tiene modos de frecuencias cercanas.

En el caso de análisis en el dominio de la frecuencia existe el método FDD (Frequency Domain Decomposition) (Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, 2000) que permite estimar propiedades dinámicas de estructuras incluso si las frecuencias son cercanas teniendo en cuenta que se hace una descomposición en frecuencia de la respuesta medida de varios canales, permitiendo desacoplar modos de frecuencias cercanas debido a que al emplear varios canales se describe la respuesta en modos de formas modales distintas. En general, esta metodología se aplica a estructuras elásticas-lineales sujetas a mediciones de vibraciones ambientales o a partir de ensayos en que se genera múltiples impactos controlados en la estructura empleando un excitador del tipo martillo, con la cual se estima la matriz de transferencia entre varias entradas y salidas.

En esa línea, en este trabajo de título se propone emplear un método SMFDD (Seismic Modal Frequency Domain Decomposition) que considere inputs sísmicos (o cualquier tipo de inputs) de manera de identificar modos de frecuencias cercanas y realizar este análisis en pequeñas ventanas de tiempo de manera de tener una representación tiempo-frecuencia asociada a cada modo en forma independiente (incluso cuando se asocian a modos de frecuencias cercanas).

De manera de poder validar los resultados se conoce que estructuras con cierto grado de simetría, tales como: estanques de almacenamiento cilíndrico, placas circulares o engranajes tienen por lo general modos con frecuencias naturales muy cercanas que controlan el movimiento. Desde un punto de vista experimental, los modos estrechamente espaciados en frecuencia son complejos de identificar, a veces se identifican como un solo modo en lugar de dos. Por lo tanto, los métodos de identificación que pueden separar los modos cercanos son en general más sofisticados, ya que requieren el uso de la medición de múltiples canales de manera que se pueda desagregar la respuesta teniendo en cuenta que las respuestas es descrita por múltiples modos con formas modales distintas (y con una participación de las entradas distintas), pero de una frecuencia similar.

Los estanques de almacenamiento cilíndricos son estructuras que requieren criterios y métodos de análisis que difieren de aquellos utilizados en edificios debido a su naturaleza y comportamiento fluido dinámico en su interior e interacción líquido-estructura. Según G. W. Housner (1963), el efecto del fluido sobre un estanque de almacenamiento se puede describir a partir de un modo impulsivo y otro convectivo. La respuesta asociada a cada modo puede ser calculada independientemente y luego ser combinada con el propósito de obtener la respuesta total del sistema. En el caso de un estanque perfectamente cilíndrico

la respuesta se observaría en la dirección de la excitación. En el caso de entradas sísmicas distintas en direcciones perpendiculares en la base, el problema se hace más complejo. Entendiéndose que en la práctica se suponen ambos movimientos desacoplados. Por otra parte, en la realidad se observa que estructuras del tipo estanque cilíndrico poseen dos modos de frecuencias cercanas que son prácticamente perpendiculares. Por otra parte, el estanque posee un cambio significativo de frecuencias a medida que es llenado o vaciado debido al cambio significativo de las masas asociadas al líquido contenido.

En este sentido se llevará a cabo un ensayo de un estanque cilíndrico sujeto a movimientos basales generados por una mesa de vibrar (horizontales) y se medirá su respuesta a medida que es vaciado. En este contexto, se identificarán cómo evolucionan las propiedades dinámicas de la estructura a través del tiempo aplicando técnicas como DSI por pequeñas ventanas y SMFDD. Se espera poder identificar la evolución temporal de modos de frecuencias cercanas que son variables en el tiempo. En este sentido los resultados de la identificación serán comparados con la identificación realizada cuando el líquido se mantiene fijo a diversos niveles de llenado empleando técnicas de identificación como Ibrahim (para pull-backs) o análisis en frecuencia.

1.2. Estado del arte

Los estanques de almacenamiento de líquidos se utilizan comúnmente para almacenar diferentes tipos de fluidos como agua, aceite, nitrógeno, gas licuado y otros tipos de combustibles. En el transcurso de su vida útil se ven sujetos a diversos tipos de carga. En este contexto la carga sísmica es primordial para garantizar la fiabilidad y seguridad de las estructuras de los estanques. Dado que la respuesta dinámica de una estructura depende de sus parámetros dinámicos, cualquier procedimiento de análisis debe comenzar con la determinación de las frecuencias naturales, formas de vibrar y razones de amortiguamientos. Cabe mencionar que estanques en almacenamiento de fluidos se observa una importante interacción fluido-estructura que se caracteriza por ser altamente no-lineal y turbulenta.

Una de las técnicas de diseño sísmico más conocida de estanques de almacenamiento de fluidos está basada en el modelo propuesto por G. W. Housner (1963) para estanques de paredes rígidas, en donde simplifica el comportamiento dinámico a una respuesta descrita por una masa móvil que se relaciona a un modo superficial del líquido (convectiva), y una masa que se mueve solidaria a las paredes del estanque (impulsiva), planteando ecuaciones que permiten determinar tales masas, rigideces y períodos, respectivamente, entre otros parámetros.

En la actualidad existen numerosas investigaciones que tienen como objetivo la identificación de parámetros dinámicos de un estanque de almacenamiento por medio del uso de algoritmos matemáticos avanzados y sofisticados.

Moslemi & Kianoush (2012), investigan el comportamiento dinámico de los estanques de agua cilíndricos rígidos y flexibles abiertos en su parte superior analíticamente con un riguroso método de elementos finitos (FEM). El objetivo principal del estudio es identificar los principales parámetros que afectan a la respuesta dinámica de dicha estructura y abordar la interacción entre estos parámetros. Los parámetros examinados incluyen el oleaje de la superficie libre del líquido (sloshing) en el interior, flexibilidad de la pared del estanque, aceleración vertical del suelo, relación de aspecto del estanque y fijación de la base. La comparación de los resultados obtenidos para los estanques rígidos y flexibles revela que al incluir la flexibilidad de la pared resulta en un aumento significativo en la parte impulsiva de la respuesta, y por lo tanto, este efecto se debe tener en cuenta en los diseños sísmicos de estanques. Sin embargo, se encuentra que la componente convectiva de la respuesta es casi independiente de la flexibilidad de la pared del estanque y, en cambio, pareciera depender de las propiedades geométricas del estanque, las propiedades del fluido y las características del movimiento del suelo. Además se indica que la altura del “sloshing” del líquido dentro del estanque no se ve afectada significativamente por la flexibilidad de la pared.

Lengvarský, Hagara, Schrötter, & Bocko (2014), describen la identificación de modos acoplados de una estructura cilíndrica axialmente simétrica. Realizan dos enfoques de ensayos modales experimentales diferentes y sus resultados se compararon con métodos numéricos. El objetivo principal del estudio es mostrar las posibilidades de usar métodos modernos de análisis modal mediante la investigación de características dinámicas de los sistemas dinámicos. Aquellos métodos son CMIF (Complex Mode Indicator Function) y FDD (Frequency domain decomposition).

Sánchez S. H. (2014), estudia el comportamiento y respuesta de estanques cilíndricos de almacenamiento para diversas condiciones de carga, en servicio y operación y en condiciones extremas por sismo. Considera los efectos hidrodinámicos que actúan sobre las paredes y el fondo del recipiente. Realiza una revisión de los criterios básicos de diseño de estas estructuras mediante cuatro documentos: Código API-650, Manual de diseño de Obras Civiles Diseño por sismo de la Comisión Federal de Electricidad CFE-93, Método modificado de Housner y Método ASCE (Método de análisis sísmico de estanques propuesto por M.A. HAROUN).

Huñady & Hagara (2015), determinan experimentalmente los parámetros modales de estructuras simétricas que tienen formas modales acopladas. Estipulan que esos modos usualmente tienen casi la misma frecuencia y aquella es la razón por la que resulta difícil identificarlos a partir de las funciones de respuesta de frecuencia (FRFs) donde sus peacks se superponen. Utilizan el método CMIF que es capaz de separar los modos acoplados al igual que FDD mediante el uso de la descomposición de valores singulares de la matriz FRFs de referencia.

Rucka & Zielińska (2015), estudian la identificación de los parámetros dinámicos de un estanque cilíndrico de acero llenado con agua. El enfoque del ensayo modal experimental involucra la excitación en un punto de la estructura y la adquisición de datos de vibración en puntos seleccionados distribuidos perimetralmente sobre el estanque permitiendo determinar las frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento. El principal enfoque de la investigación fue examinar la influencia de la altura del agua al interior del estanque en los parámetros modales. El estudio experimental muestra que el nivel del agua en el estanque tiene un importante impacto en los valores de las frecuencias naturales y razones de amortiguamiento. Las frecuencias fundamentales identificadas decrecen gradualmente con el incremento del nivel del agua en su interior para todos los modos de vibración considerados y las razones de amortiguamiento se mantienen constantes con un nivel sobre el 50% de llenado del estanque. Además, el nivel del agua no tuvo considerables efectos en la identificación de formas modales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Identificar las propiedades dinámicas de un estanque de almacenamiento de líquidos con nivel de agua constante y variable en el tiempo mediante la aplicación de la técnica SMFDD por pequeñas ventanas de tiempo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar y montar un ensayo experimental de un estanque de masa de agua variable a escala, donde se aplicará excitaciones basales con mesa vibradora y se medirán las respuestas de aceleraciones del estanque que se producen a distintos niveles de altura de agua y cuando es vaciado en el tiempo.
- Medir la respuesta de la estructura ensayada cuando se considera ensayos del tipo pull-back.
- Medir la respuesta de la estructura para una excitación en su base con y sin variación de masa.
- Conocer la altura de agua y volumen al interior del estanque en todo momento del ensayo experimental.
- Obtener registros visuales tanto dentro como fuera del estanque.
- Aplicar el método ITD, en los registros de aceleraciones de respuesta de decaimiento libre de vibración producto de ensayos de impacto del tipo pull-back, para la identificación de las propiedades dinámicas de la estructura.
- Aplicar el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo a los registros de aceleraciones de respuesta ante ensayos dinámicos y vaciado de estanque, para realizar la identificación de la evolución temporal de las propiedades dinámicas de estructuras variables en el tiempo.
- Aplicar Espectrogramas y Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo, para realizar identificación de las frecuencias de estructuras con y sin variación de masa en el tiempo.
- Estudiar e implementar el Método SMFDD por pequeñas ventanas de tiempo, con el fin de identificar las propiedades dinámicas.
- Determinar cómo varían las propiedades dinámicas del estanque a medida que es vaciado en el tiempo mientras está siendo excitado en su base.

- Comparar los resultados de la evolución de las propiedades dinámicas en función del tiempo de vaciado del estanque, utilizando los métodos, ITD, DSI, espectrogramas y función de transferencia por pequeñas ventanas.
- Comparar los resultados de la evolución de las propiedades dinámicas en función de la altura de llenado del estanque, utilizando los métodos, ITD, DSI y SMFDD.
- Desacoplar los modos de frecuencias cercanas.
- Validar los resultados obtenidos con el método SMFDD dado los resultados de los otros métodos aplicados, y establecer sus ventajas y desventajas.

1.4. Metodología

Para realizar la memoria de título, se seguirá la siguiente metodología:

1.4.1. Revisión bibliográfica sobre el comportamiento de estanques de almacenamiento de líquidos

Se investiga la bibliografía pertinente, recopilando antecedentes sobre:

- Normas que controlan el diseño de estanques cilíndricos de almacenamiento de líquidos (API 650 y ACI 350).
- Estudios utilizando métodos tradicionales del comportamiento dinámico de estructuras.
- Estudios analíticos sobre métodos numéricos de modelación de estanques cilíndricos de almacenamiento de líquido e identificación de sus propiedades dinámicas.
- Investigaciones sobre métodos de análisis de ensayo modal operacional y experimental, siendo los más comúnmente mencionados ITD, CMIF, DSI, FDD y SSI.
- Investigación relacionada a métodos tiempo-frecuencia como espectrograma, función de transferencia por pequeñas ventanas. Además del uso del método DSI por pequeñas ventanas de tiempo.
- Implementación y uso de los métodos por pequeñas ventanas de tiempo, que permitan determinar la evolución de los parámetros modales de una estructura en función de excitaciones basales (inputs) y la respuesta de la misma (Outputs).
- Los parámetros modales que se deben determinar para conocer el comportamiento dinámico de una estructura y descripción de los métodos de identificación que son utilizados para llevarlo a cabo.

1.4.2. Montaje Experimental de estructura a escala

Se adapta un estanque de almacenamiento de líquido cilíndrico de HDPE al cual se le instala un sistema de salida de agua en su parte inferior. Se empotra la estructura en la mesa vibradora. Para ello, se utiliza una placa base de madera y una abrazadera de acero.

Encontrar una solución para facilitar el ingreso de luz al interior del estanque e instalar cámaras que puedan captar registros visuales tanto al interior como al exterior.

1.4.3. Ensayos en laboratorio

Una vez que el estanque es montado en la mesa vibradora, este se instrumenta con acelerómetros y sensores ultrasónicos. La mesa reproducirá movimientos sísmicos provenientes de registros de aceleraciones aleatorias generados con Matlab. Los movimientos serán solo en el plano horizontal, ejes x e y de la mesa vibradora.

Se realizarán ensayos de impacto y ensayos dinámicos con y sin variación de masa en el tiempo.

El objetivo de esta parte será adquirir los registros de aceleraciones de respuesta (Outputs) de la estructura debido a diversas acciones generadas en el estanque.

1.4.3.1. Inputs y Outputs

Los inputs o datos de entrada corresponden a las solicitaciones que afectarán a la estructura.

Los outputs o datos de salida corresponden a la respuesta de la estructura.

La instrumentación del estanque contempla el uso de 3 sensores ultrasónicos y 13 acelerómetros dispuestos en diversos puntos de la estructura. Dos acelerómetros, serán colocados en la placa base de madera que soporta el estanque, A12 y A11, uno en cada dirección correspondiente a los ejes X e Y de la mesa, respectivamente. Con el fin de captar los movimientos de la mesa.

En la base del estanque se instalarán dos acelerómetros, uno en cada dirección correspondientes a los ejes X e Y de la mesa vibradora, acelerómetros A6 y A3, respectivamente.

Dependiendo del método que se utilice para identificar las propiedades dinámicas es que se utilizará los acelerómetros A12 y A11 o los acelerómetros A6 y A3 como inputs.

Los sensores restantes serán utilizados como outputs en todo momento y estarán colocados en el perímetro del estanque a distintas alturas.

1.4.4. Aplicación del Método ITD

Se aplican rutinas de Matlab con el método en el dominio del tiempo ITD (Ibrahim Time Domain) que requieren datos de respuestas de decaimiento libre o función de respuesta de impulso de las estructuras.

1.4.5. Aplicación del Método DSI por pequeñas ventanas de tiempo

Se utilizan rutinas de Matlab modificadas por Pablo Díaz (2017) que permiten la identificación de propiedades dinámicas de estructuras con múltiple entradas y múltiples

salidas (MIMO) a través del método Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI) (Van Overschee, P. & De Moor, 1996) de manera de estudiar la evolución de las propiedades dinámicas en el tiempo por pequeñas ventanas, es decir, se supone que la estructura tiene propiedades invariantes durante pequeñas ventanas de tiempo.

1.4.6. Aplicación de Espectrogramas

Se aplica la herramienta espectrograma a cada registro de salida (outputs) con el fin de estudiar la variación temporal de las frecuencias predominantes en los canales analizados. El método no contiene un nexo con la señal de entrada (Inputs). El espectrograma arroja como resultado un gráfico tiempo-frecuencia.

1.4.7. Aplicación del Método Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tfTF)

Se utilizan rutinas de Matlab con el método Función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tfTF). El cual permite estudiar la variación temporal de las frecuencias modales de una estructura en función de un registro de salida (Output) y un registro de entrada (Input). La Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo ofrece un gráfico tiempo-frecuencia de características similares a un espectrograma.

1.4.8. Comparación de métodos

Con los resultados obtenidos de los métodos ya mencionados se superponen en un gráfico de Espectrograma y Función de Transferencia con el fin de compararlos.

1.4.9. Implementación y aplicación del método SMFDD

Se estudiará e implementará el algoritmo propuesto para el análisis modal tradicional de estructuras denominado Seismic Modal Frequency Domain Decomposition (SMFDD) para el caso sísmico por pequeñas ventanas de tiempo. La implementación se realizará en Matlab.

1.4.10. Determinación de parámetros dinámicos

Para el caso ensayos del tipo pull-back, se trabaja solo con los “outputs” que corresponden a los registros de aceleración de respuesta del sistema captada por los acelerómetros dispuestos en el estanque debido al efecto generado por impactos realizados en diversas direcciones con un martillo.

Para la identificación de las propiedades dinámicas del estanque sujeto a acciones en su base se considerará como “inputs” los registros de aceleraciones captados por los sensores que son colocados en la base de la estructura. Los “outputs” serán los registros de

aceleraciones captados por los sensores dispuestos en el perímetro de la estructura. Se aplicarán los métodos DSI, Espectrograma, Función de Transferencia y SMFDD a este tipo de datos experimentales.

1.4.11. Análisis y validación de resultados

Se llevará a cabo el análisis de resultados, comparando los parámetros dinámicos obtenidos con cada método de análisis y en particular con el método SMFDD que son los resultados que se desean validar.

Capítulo 2

Antecedentes

Para conocer el comportamiento dinámico aproximado de un estanque es posible recurrir a las ecuaciones de Housner (1963) o normas de diseño con las cuales son comúnmente diseñados y construidos. En este capítulo se presentan como antecedentes el método de Housner y las consideraciones de normas de diseño de estanques comúnmente utilizadas.

2.1. Método de Housner (1963): modelo dinámico de estanques

G. W. Housner en 1963, desarrolla un método simplificado sobre el comportamiento dinámico de estanques de almacenamiento de líquido de paredes rígidas. Estipula que si un estanque cilíndrico de radio R , empotrado al suelo, que contiene una superficie de agua libre a una altura h desde la base, es sometido a una aceleración horizontal del suelo, la parte superior del contenido en su interior experimentará “sloshing” (oleaje oscilatorio o componente convectiva) con altura máxima de ola d desde la superficie libre de agua (S.L), ver Figura 2.1. (a). Luego, toda la masa de agua en el interior ejercerá fuerzas en las paredes internas del estanque produciéndose una interacción fluido-estructura. Aquella es modelada como se muestra en la Figura 2.1. (b).

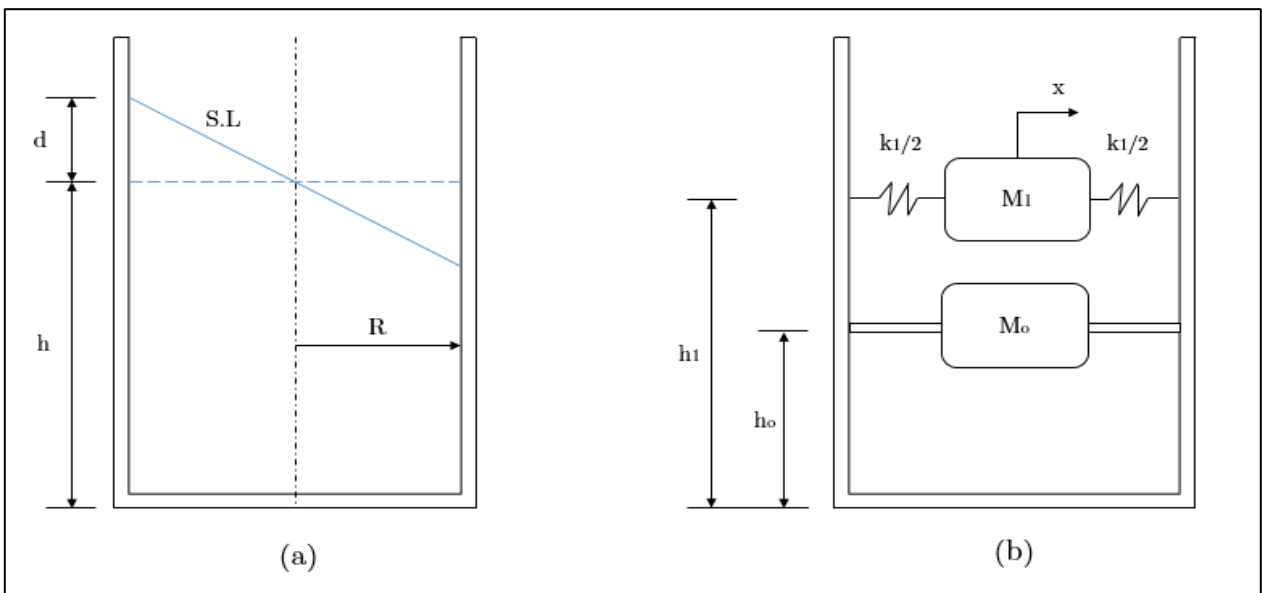


Figura 2.1. Sistema dinámico de Housner equivalente para un estanque de agua. Fuente: (Housner, 1963).

Se considera que una porción del líquido actúa como una masa M_o , denominada *masa impulsiva*, que está unida solidariamente al estanque a una altura h_o desde la base. Otra cantidad de masa M_1 , denominada *masa convectiva*, se considera que oscila horizontalmente contra un resorte de rigidez k_1 a una altura h_1 desde la base. Las fuerzas ejercidas por las masas M_o y M_1 son las mismas que la fuerza resultante ejercida por el agua equivalente en el estanque, respectivamente. La masa M_1 se corresponde al modo fundamental de oscilación del agua, que es el modo de importancia ante movimientos sísmicos del suelo.

Considerando que la masa total de agua al interior del estanque es M , el sistema equivalente está especificado por las siguientes ecuaciones:

$$M_o = M \frac{\tanh(1,7R/h)}{1,7R/h} \quad (2.1)$$

$$M_1 = M \cdot (0,6) \frac{\tanh(1,8R/h)}{1,8R/h} \quad (2.2)$$

$$k_1 = 5,4 \frac{M_1^2}{M} \cdot \frac{gh}{R^2} \quad (2.3)$$

$$h_o = \frac{3}{8} h \left\{ 1 + \alpha \left[\frac{M}{M_1} \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 1 \right] \right\} \text{ con } \alpha = 1,33 \quad (2.4)$$

$$h_1 = h \left[1 - 0,185 \frac{M}{M_1} \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 0,56\beta \frac{R}{h} \sqrt{\left(\frac{MR}{3M_1 h} \right)^2 - 1} \right] \text{ con } \beta = 2,0 \quad (2.5)$$

Luego, se obtiene el periodo de vibración T_ω :

$$T_\omega = 2\pi \sqrt{\frac{M_1}{k_1}} \quad (2.6)$$

La oscilación máxima del fluido está relacionada con la oscilación de la masa M_1 como sigue. Si M_1 está oscilando con desplazamiento $x = A_1 \cdot \sin(\omega t)$ la cresta de la ola en las paredes del estanque oscilará hacia arriba y abajo con desplazamiento $y = d \cdot \sin(\omega t)$ y en el estanque cilíndrico:

$$d = \frac{0,63A_1 \left(\frac{k_1 R}{M_1 g} \right)}{1 - 0,85A_1 \left(\frac{k_1 R}{M_1 g} \right)^2} \quad (2.7)$$

Las ecuaciones anteriores dan resultados razonables para amplitudes de vibración $d < 0,2h$ y en el caso contrario cuando las amplitudes son mayores, se observa una no linealidad en las oscilaciones (Housner, 1963).

Para el cálculo de A_1 es necesario obtener el espectro de respuesta elástico de la estructura ya que es posible establecer las siguientes relaciones:

$$A_1 = S_d \quad (2.8)$$

$$A_1 = S_v \frac{T_\omega}{2\pi} \quad (2.9)$$

$$A_1 = S_a \left(\frac{T_\omega}{2\pi} \right)^2 \quad (2.10)$$

Donde:

S_d : Espectro de desplazamiento de la estructura.

S_v : Espectro de velocidad de la estructura.

S_a : Espectro de aceleración de la estructura.

Para el cálculo de los espectros de respuesta de la estructura de este trabajo se utiliza el método de Newmark con aceleraciones constantes (Chopra, 2014).

2.1.1. API 650 “Welded Steel tanks for oil storage”

En el apéndice E de la norma llamado “Diseño sísmico de estanques de almacenamiento” se detalla lo siguiente:

“Este apéndice proporciona los requisitos mínimos para el diseño de estanques de almacenamiento de acero soldados que pueden estar sujetos a movimientos sísmicos en el suelo. Estos requisitos representan una práctica aceptada para la aplicación a estanques de fondo plano de acero soldado. El objetivo fundamental de rendimiento para el diseño sísmico en este apéndice es la protección de la vida y la prevención del colapso catastrófico del estanque. La aplicación de esta norma no implica que no se produzcan daños en el tanque y los componentes relacionados durante los eventos sísmicos” (American Petroleum Institute, 2007).

2.1.1.1. Período de vibración estructural

El método de análisis modal pseudo-dinámico utilizado para establecer el comportamiento de estanques se basa en el período natural de la estructura y otros contenidos definidos en el apéndice E de la norma. Además de conceptos que se basan en el modelo de Housner.

2.1.1.1.1. Período natural impulsivo

Aquel se define como sigue en la siguiente ecuación:

$$T_i = \left(\frac{1}{\sqrt{2000}} \right) \left(\frac{C_i H}{\sqrt{t_u}} \right) \left(\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

T_i : Período natural de vibración para el comportamiento modal impulsivo, (seg).

C_i : Coeficiente para determinar el período impulsivo del estanque.

H : Máximo nivel de diseño del líquido, (m).

D : Diámetro nominal del estanque, (m).

t_u : Espesor equivalente uniforme de la pared del estanque (mm).

ρ : Densidad del fluido, (kg/m³).

E : Módulo de elasticidad del material del estanque, (Mpa).

El Coeficiente C_i se obtiene del gráfico mostrado en la Figura 2.2.

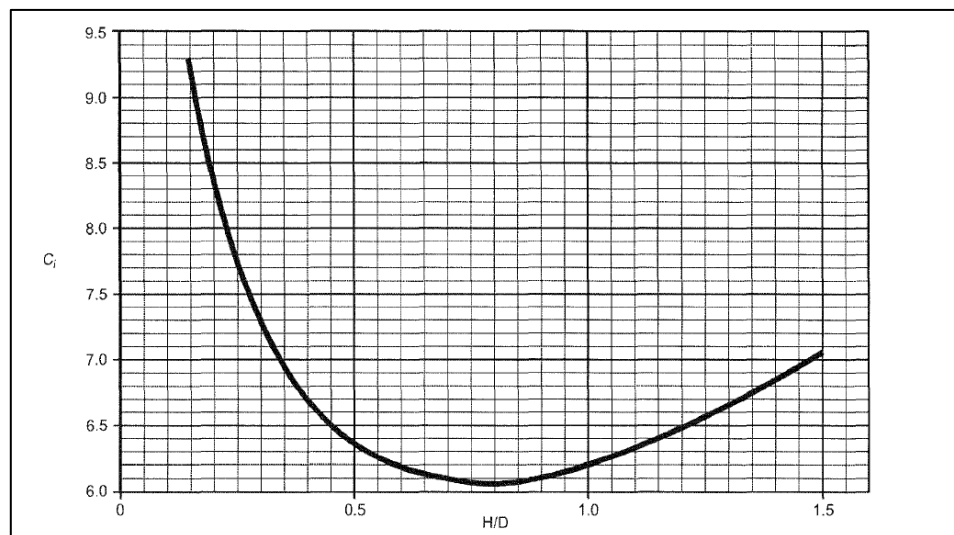


Figura 2.2. Relación H / D para el cálculo de C_i .

Fuente: (American Petroleum Institute, 2007).

2.1.1.1.2. Período convectivo (Sloshing)

El primer período modal del sloshing de la ola, en segundos, se calcula mediante la ecuación:

$$T_c = 1,8K_s\sqrt{D} \quad (2.12)$$

Donde:

T_c : Período natural modal del comportamiento convectivo del líquido (sloshing), (seg).

K_s : Coeficiente del período de sloshing.

Para el cálculo de K_s se tiene la Ecuación:

$$K_s = \frac{0,578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3,68H}{D}\right)}} \quad (2.13)$$

2.1.2. ACI 350 “Seismic Design of Liquid Containing Concrete Structures”

En el capítulo 9 de la norma se establece que los procedimientos de diseño reconocen que el análisis sísmico de las estructuras que contienen líquidos sometidas a una aceleración horizontal debe incluir las fuerzas de inercia generadas por la aceleración de la propia estructura; y las fuerzas hidrodinámicas generadas.

La Figura 2.3 muestra un modelo dinámico equivalente, que se asemeja casi en su totalidad al modelo dinámico de Housner (Figura 2.1), para calcular las fuerzas sísmicas resultantes que actúan en un estanque de almacenamiento de líquido con la base al suelo y paredes rígidas. En este modelo, W_i representa el efecto resultante de las presiones sísmicas impulsivas en las paredes del estanque. W_c representa la resultante de las presiones del fluido que experimenta sloshing.

En el modelo, W_i está sujetado rígidamente a las paredes del estanque a una altura h_i sobre el fondo del estanque, que corresponde a la ubicación de la fuerza impulsiva resultante P_i . W_i se mueve con las paredes del estanque cuando responden a las excitaciones del suelo (se supone que el fluido es incompresible). Las presiones impulsivas son generadas por las aceleraciones sísmicas de las paredes del estanque, de modo que la fuerza P_i se divide uniformemente en una fuerza de presión en la pared que acelera en el fluido, y una fuerza de succión en la pared que se acelera alejándose del fluido. Durante un terremoto, la fuerza P_i cambia de dirección varias veces por segundo, con respecto al

cambio en la dirección de la aceleración de la base; el momento de volcamiento generado por P_i es, por lo tanto, frecuentemente ineficaz para tender a volcar el estanque.

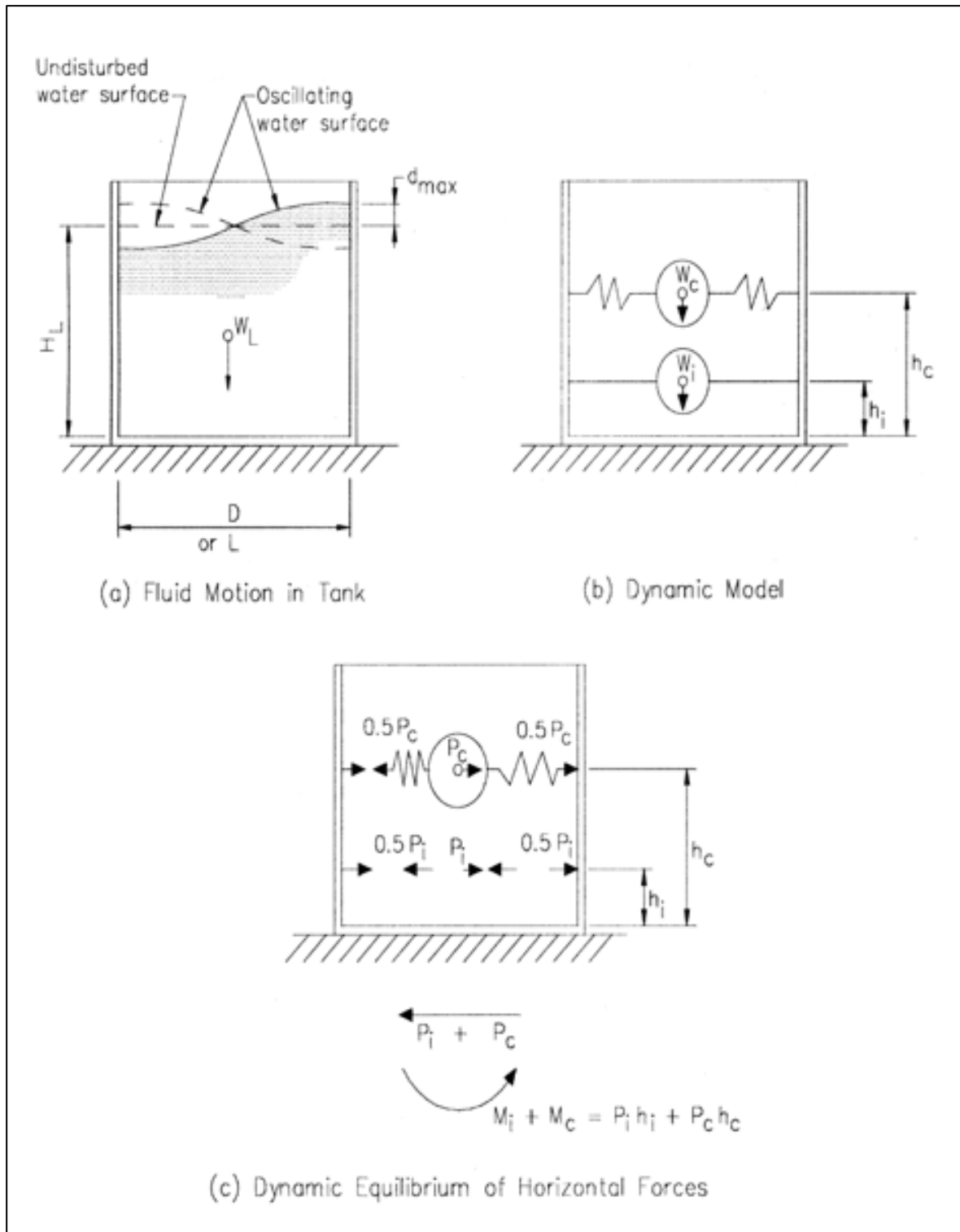


Figura 2.3. Modelo dinámico líquido-contenido en estanque rígido apoyado en el suelo.
Fuente: (American Concrete Institute, 2001).

El parámetro W_c es la masa equivalente del fluido oscilante que produce las presiones de convección en las paredes del estanque con la fuerza resultante P_c , que actúa a una altura h_c sobre el fondo del estanque. En el modelo, W_c se sujeta a las paredes del estanque mediante resortes que producen un período de vibración correspondiente al período del sloshing del fluido. Las presiones del sloshing en las paredes del estanque resultan del movimiento del fluido asociado con la oscilación de la onda. El período de oscilación del sloshing depende de la relación entre la profundidad del fluido y el diámetro del estanque y generalmente es de varios segundos. El momento de volcante ejercido por P_c actúa durante un tiempo suficiente para tender a levantar la pared del estanque si no hay suficiente peso de restricción. Las fuerzas P_i y P_c actúan de forma independiente y simultánea en el estanque. La fuerza P_i (y sus presiones asociadas) actúan principalmente para tensionar la pared del estanque, mientras que P_c actúa principalmente para elevar la pared del estanque. Las vibraciones verticales del suelo también se transmiten al fluido, produciendo así presiones que actúan sobre las paredes del tanque.

A continuación, se presentan las ecuaciones que determinan el diseño con esta norma.

2.1.2.1. Masas equivalentes del líquido en aceleración (excluyendo la presión base)

En el gráfico de la Figura 2.4 se observa la relación de las siguientes ecuaciones.

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh \left[0,866 \left(\frac{D}{H_L} \right) \right]}{0,866 \left(\frac{D}{H_L} \right)} \quad (2.14)$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0,230 \left(\frac{D}{H_L} \right) \tanh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \right] \quad (2.15)$$

Donde:

W_i : Masa equivalente de la componente impulsiva del líquido almacenado, (kN).

W_c : Masa equivalente de la componente convectiva del líquido almacenado, (kN).

W_L : Masa total del líquido almacenado, (kN).

D : Diámetro interno del estanque cilíndrico, (m).

H_L : Profundidad de diseño del líquido almacenado, (m).

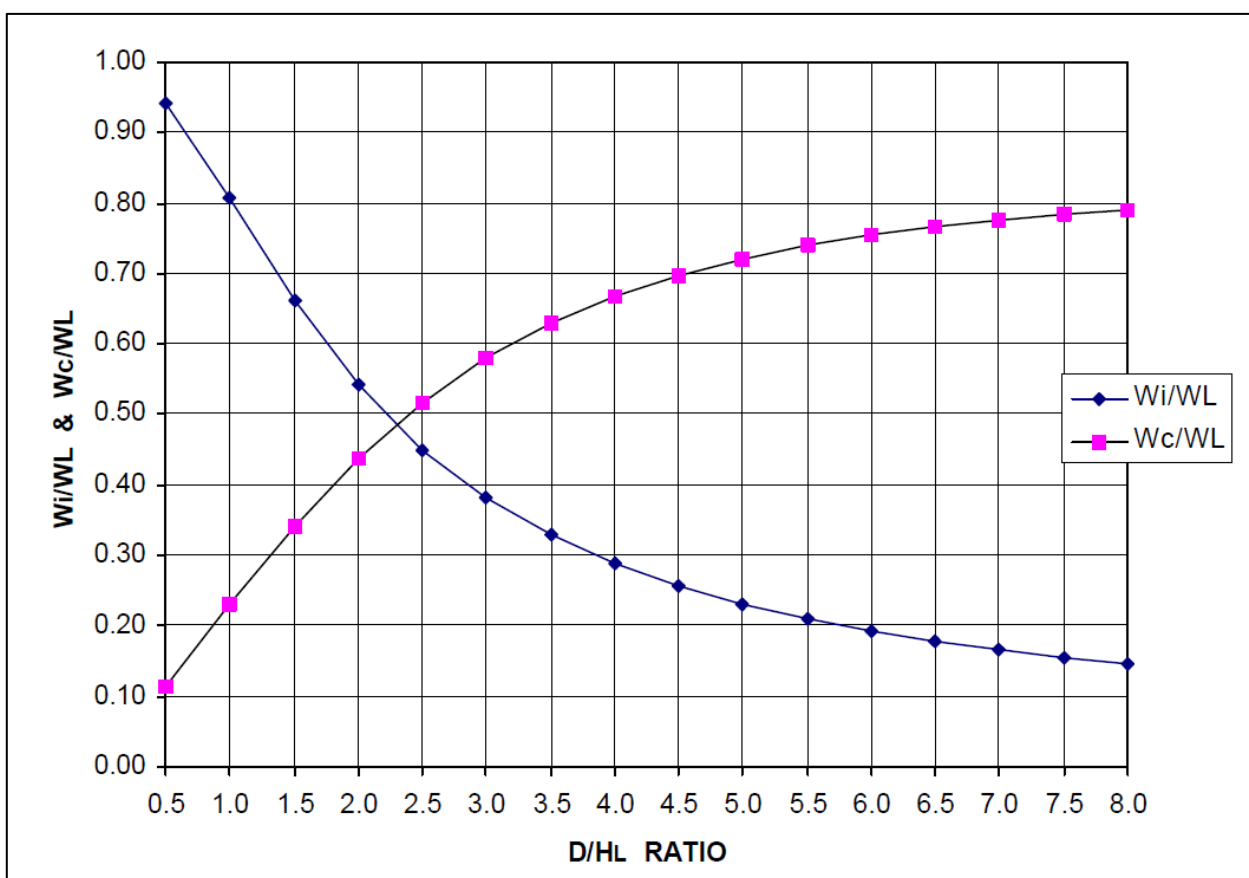


Figura 2.4. Factores W_i/W_L y W_c/W_L versus razón D/H_L para estanques circulares.

Fuente: (American Concrete Institute, 2001).

2.1.2.2. Alturas de los centros de gravedad (excluyendo la presión base)

En el gráfico de la Figura 2.5 se observa la relación de las siguientes ecuaciones.

Para estanques con $\frac{D}{H_L} < 1,333$:

$$\frac{h_i}{H_L} = 0,5 - 0,09375 \left(\frac{D}{H_L} \right) \quad (2.16)$$

Para estanques con $\frac{D}{H_L} \geq 1,333$:

$$\frac{h_i}{H_L} = 0,375 \quad (2.17)$$

Para todos los estanques:

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \right] - 1}{3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \cdot \sinh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \right]} \quad (2.18)$$

Donde:

h_i (EBP): Altura sobre la base de las paredes del estanque al centro de gravedad de la fuerza lateral impulsiva, (m).

h_c (EBP): Altura sobre la base de las paredes del estanque al centro de gravedad de la fuerza lateral convectiva, (m).

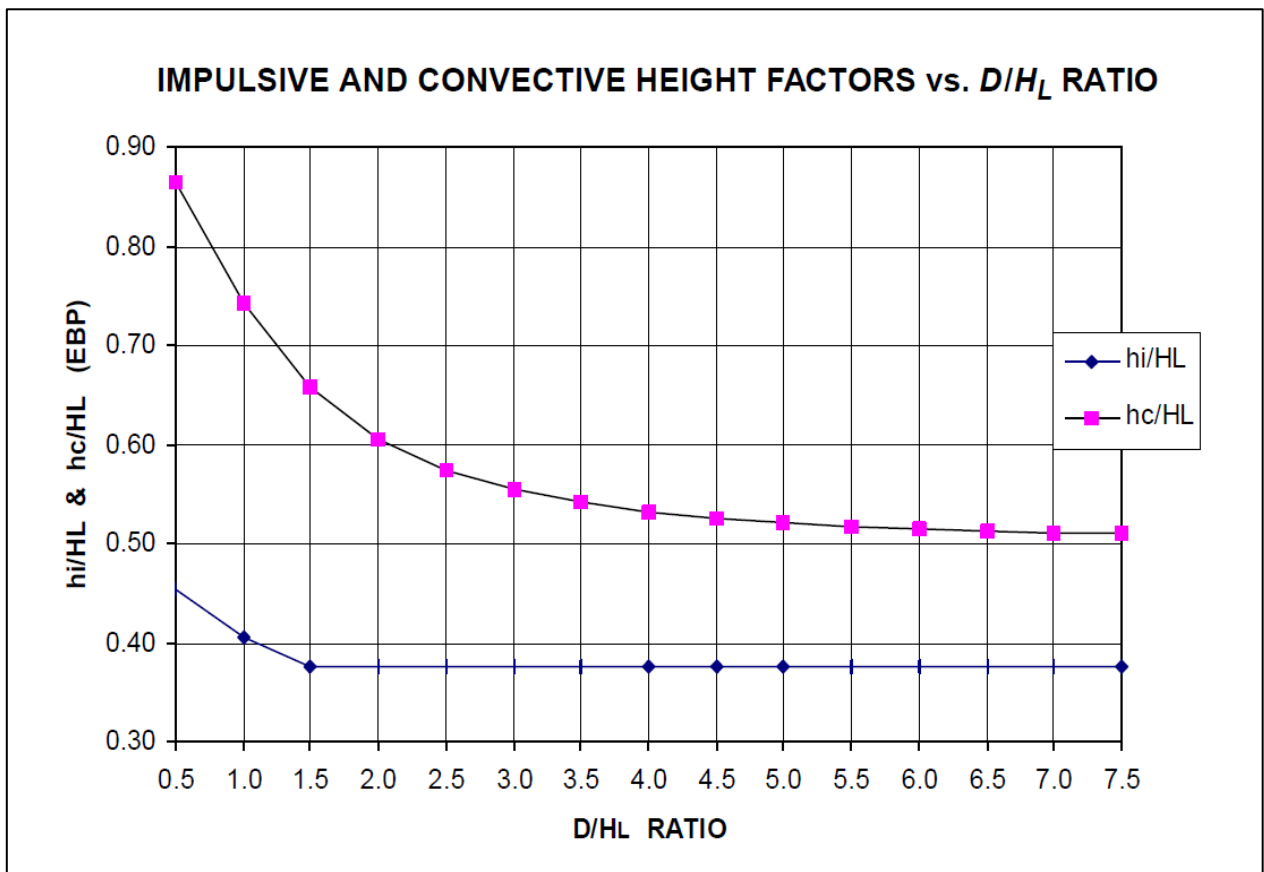


Figura 2.5. Factores h_i/H_L y h_c/H_L versus razón D/H_L para estanques circulares (EBP).

Fuente: (American Concrete Institute, 2001).

2.1.2.3. Altura de los centros de gravedad (incluyendo la presión base)

En el gráfico de la Figura 2.6 se observa la relación de las siguientes ecuaciones.

Para estanques con $\frac{D}{H_L} < 0,75$:

$$\frac{h_i'}{H_L} = 0,45 \quad (2.19)$$

Para estanques con $\frac{D}{H_L} \geq 0,75$:

$$\frac{h_i'}{H_L} = \frac{0,866 \left(\frac{D}{H_L} \right)}{2 \cdot \tanh \left[0,866 \left(\frac{D}{H_L} \right) \right]} - \frac{1}{8} \quad (2.20)$$

Para todos los estanques:

$$\frac{h_c'}{H_L} = 1 - \frac{\cosh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \right] - 2,01}{3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \cdot \sinh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \right]} - \frac{1}{8} \quad (2.21)$$

Donde:

h_i' (IBP): Altura sobre la base de las paredes del estanque al centro de gravedad de la fuerza lateral impulsiva, (m).

h_c' (IBP): Altura sobre la base de las paredes del estanque al centro de gravedad de la fuerza lateral convectiva, (m).

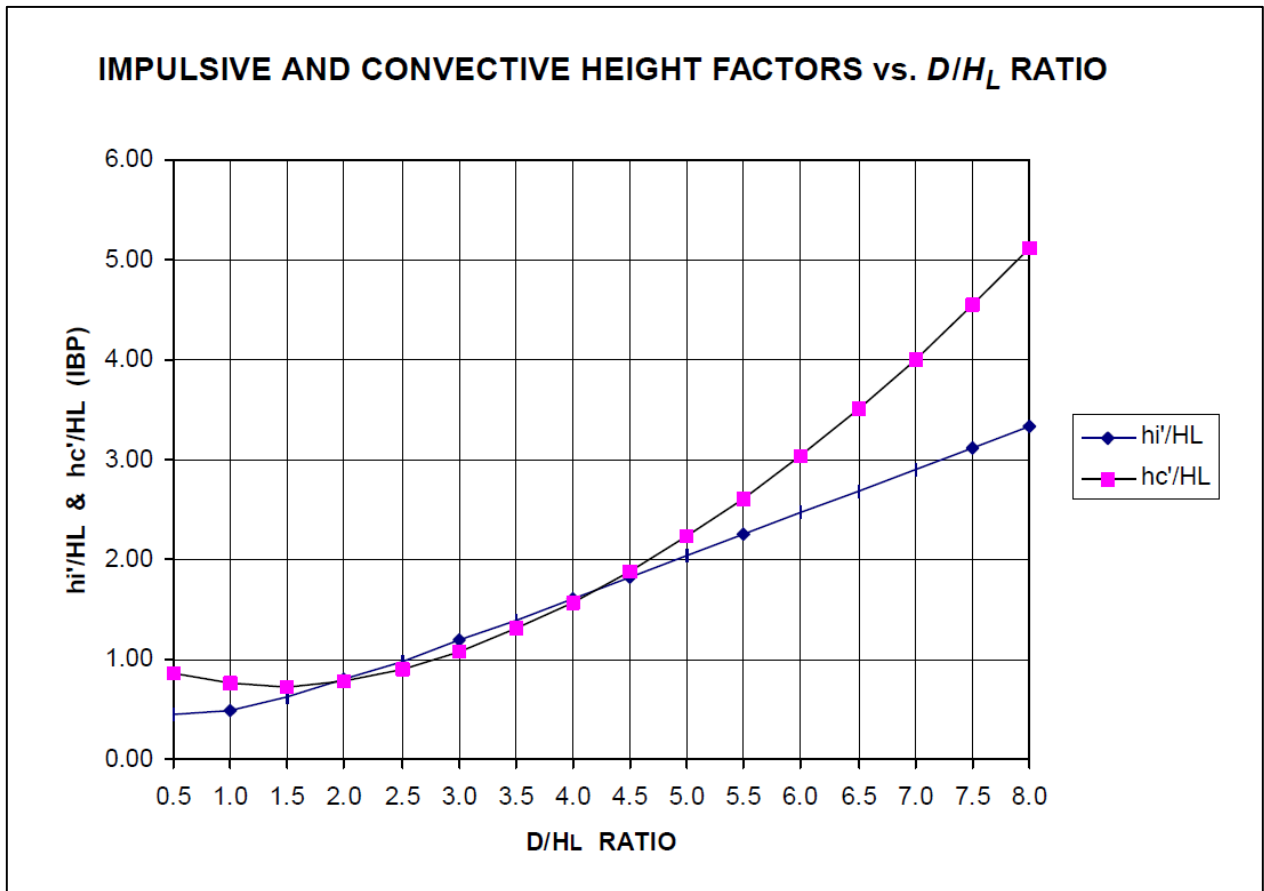


Figura 2.6. Factores h_i'/H_L y h_c'/H_L versus razón D/H_L para estanques circulares (IBP).

Fuente: (American Concrete Institute, 2001).

2.1.2.4. Propiedades dinámicas

Para estanques circulares y rectangulares:

$$\omega_i = C_i \cdot \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{10^3 E_c}{\rho_c}} \quad (2.22)$$

$$C_i = C_w \cdot 10 \sqrt{\frac{t_w}{10R}} \quad (2.23)$$

Para $\frac{D}{H_L} > 0,667$ (ver Figura 2.7):

$$C_w = 9,375 \cdot 10^{-2} + 0,2039 \left(\frac{H_L}{D} \right) - 0,1034 \left(\frac{H_L}{D} \right)^2 - 0,1253 \left(\frac{H_L}{D} \right)^3 + 0,1267 \left(\frac{H_L}{D} \right)^4 - 3,186 \cdot 10^{-2} \left(\frac{H_L}{D} \right)^5 \quad (2.24)$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (2.25)$$

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{D}} \quad (2.26)$$

$$\lambda = \sqrt{3,68g \cdot \tanh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \right]} \quad (2.27)$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{D} \quad (2.28)$$

Donde:

ω_i : Frecuencia circular del modo impulsivo de vibración, (rad/s).

ω_c : Frecuencia circular de oscilación del primer modo (convectivo) de sloshing, (rad/s).

T_i : Período fundamental de oscilación del estanque (más la componente impulsiva del contenido), (s).

C_l, C_w : Coeficientes para determinar la frecuencia fundamental del sistema líquido-estanque.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto, (MPa).

ρ_c : Densidad de masa del concreto, ($2,4 \text{ kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$).

t_w : Espesor promedio de la pared, (mm).

R : Radio interno del estanque circular, (m).

λ : Coeficiente.

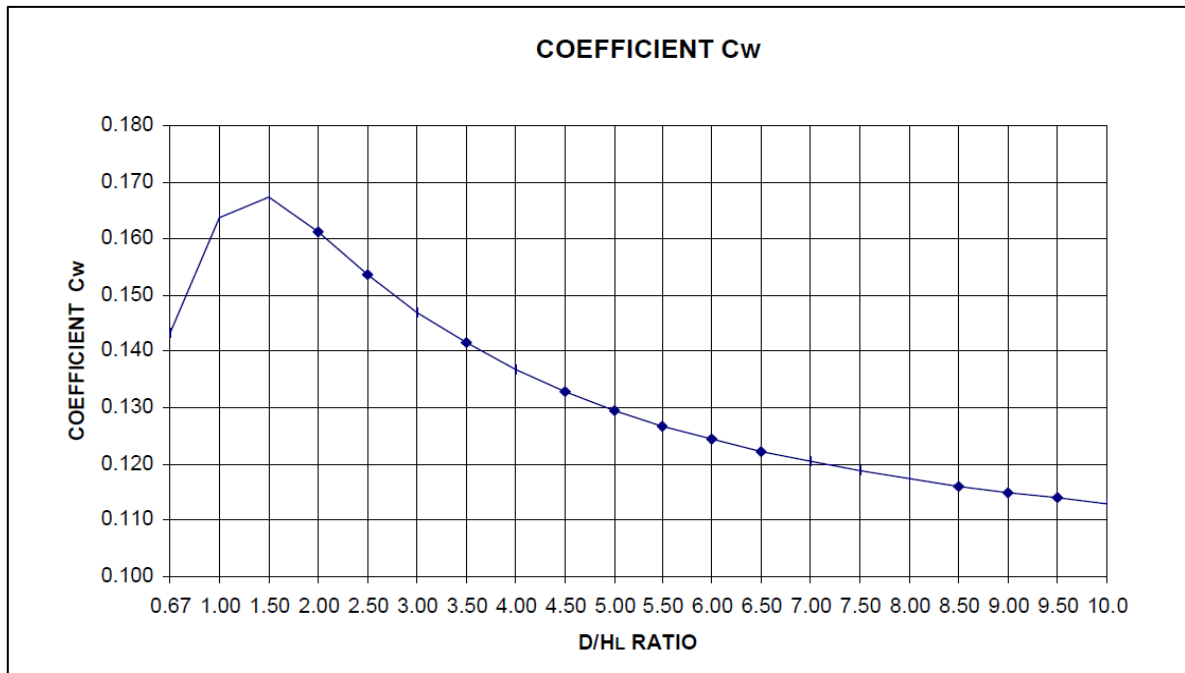


Figura 2.7. Coeficiente C_w para estanques circulares.

Fuente: (American Concrete Institute, 2001).

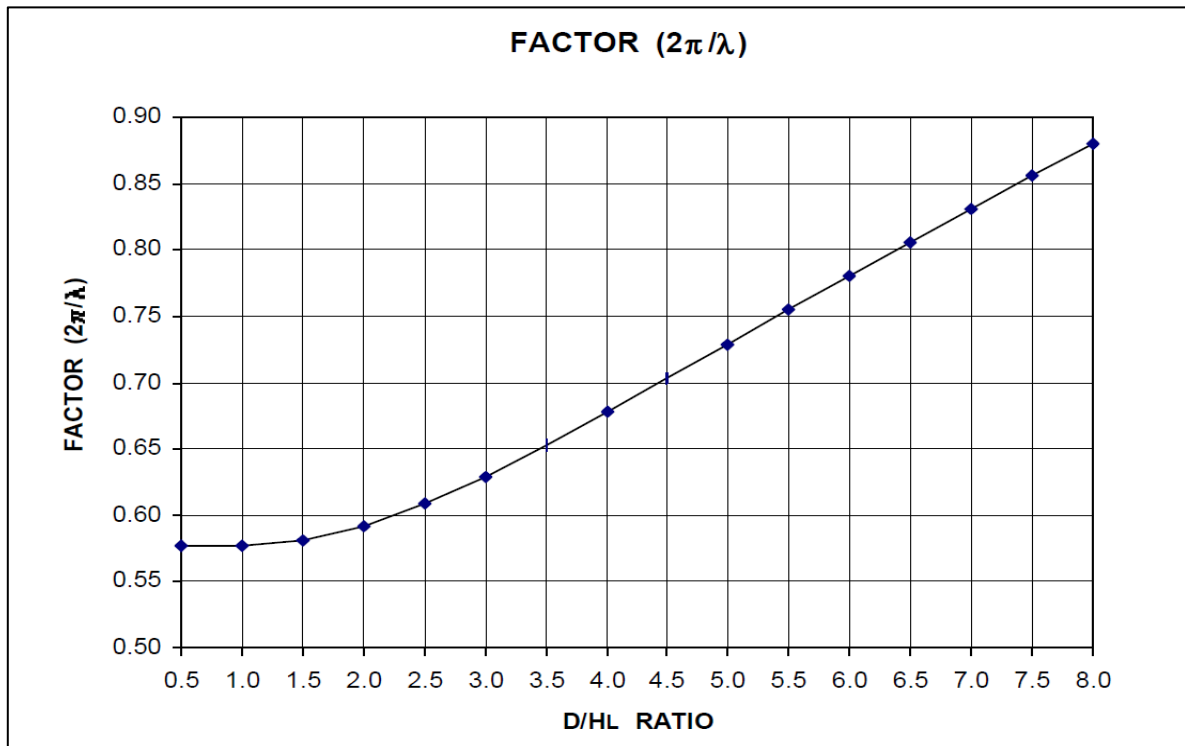


Figura 2.8. Factor $2\pi/\lambda$ para estanque circulares.

Fuente: (American Concrete Institute, 2001).

Capítulo 3

Ensayo Modal de Estructuras

El ensayo modal es utilizado para determinar los parámetros modales de las estructuras de ingeniería, tales como frecuencias naturales, razones de amortiguamiento y formas modales. Las mediciones de datos de excitación y respuesta (o sólo respuesta) son utilizadas en el análisis modal, y luego se procesa el análisis dinámico de señales y la identificación de parámetros modales.

El estudio experimental de la vibración estructural ha proporcionado una importante contribución para comprender y controlar los numerosos fenómenos de vibración que se encuentran en la práctica. Las observaciones experimentales tienen los dos objetivos principales de (a) determinar la naturaleza y el alcance de los niveles de respuesta de la vibración y (b) verificar modelos teóricos y predicciones.

El análisis modal puede llevarse a cabo operacional y experimentalmente.

El análisis modal operacional se basa en la medida de la respuesta de la estructura usando sólo el ambiente y las fuerzas de servicio que actúan sobre la misma. Se usa para obtener una descripción modal de la estructura bajo sus condiciones de operación. En vez de cargar la estructura artificialmente y tratar la excitación ambiental como una fuente de ruido no deseado, la excitación natural se usa como fuente de excitación.

En el análisis modal experimental o tradicional los parámetros modales se obtienen de las funciones de respuesta en frecuencia (FRFs), que relacionan la salida (respuesta) con la entrada (excitación).

En la Figura 3.1 se muestra un esquema resumen de los tipos de análisis modal.

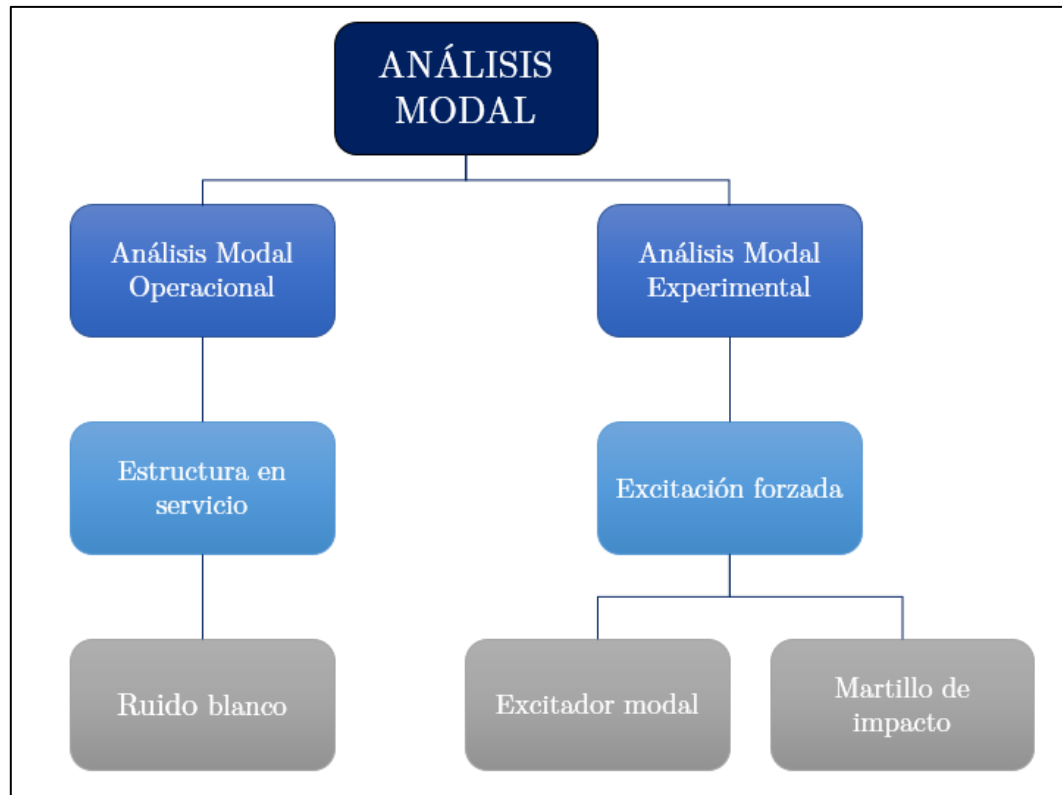


Figura 3.1. Tipos de Ensayo Modal. Fuente: (Castro T., 2016).

3.1. Etapas del Ensayo modal

Ensayo modal consiste en 4 etapas que se señalan a continuación.

3.1.1. Montaje del sistema experimental

Etapa donde se monta la estructura en un excitador modal (si es necesario) y es instrumentada con una determinada posición estratégica de sensores. Existe una cantidad infinita de mediciones posibles, es por ello, que se recomienda considerar la cantidad mínima de mediciones necesarias para lograr la identificación de propiedades dinámicas de la estructura.

3.1.2. Adquisición de datos y estimación de las funciones de respuesta en frecuencia (FRF)

Las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) relaciona la respuesta del sistema con la excitación recibida. La respuesta puede ser medida como desplazamientos, velocidades o aceleraciones.

Experimentalmente, las FRF provienen de datos analógicos que se miden con los sensores, a los cuales se les aplica filtros. Posteriormente, se digitaliza la señal analógica a través de un conversor analógico-digital (ADC). Una vez logrado esto, se traspasan los datos del

dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

3.1.3. Identificación de los parámetros dinámicos mediante Análisis Modal

A partir de los datos obtenidos de la etapa anterior, se desarrollan diversos métodos de análisis modal basados en algoritmos matemáticos para la obtención de las propiedades dinámicas.

3.1.4. Validación de resultados

Tras la aplicación de los métodos de identificación modal, se analizan los parámetros dinámicos y se comprueban hayan sido obtenidos correctamente. Frecuentemente se utiliza la comparación de resultados obtenidos por medio de distintos métodos.

3.2. Métodos de Análisis Modal

El ensayo modal viene de la mano con la utilización de métodos de análisis modal, los cuales se pueden clasificar según varios criterios, el más inmediato es según el dominio en que trabaje cada uno, clasificándolos en los métodos en el dominio de la frecuencia (que suelen trabajar con FRF) y en el dominio del tiempo, los cuales la variable de entrada suelen ser las funciones de respuesta al impulso (IRFs).

En la Figura 3.2 representa un ejemplo sencillo de cómo se trabaja en cada dominio. La función de respuesta en frecuencia $H(f)$ en el dominio de la frecuencia y la función de respuesta al impulso $h(t)$ en el dominio del tiempo son utilizadas para describir la relación entrada-salida (excitación-respuesta) de cualquier sistema, donde la señal $a(t)$ y $b(t)$ representan la entrada y las salida del sistema físico, respectivamente. El sistema se asume lineal e invariante en el tiempo.

La transformada rápida de Fourier (FFT) transforma una señal en el dominio del tiempo a otra en el dominio de la frecuencia y viceversa.

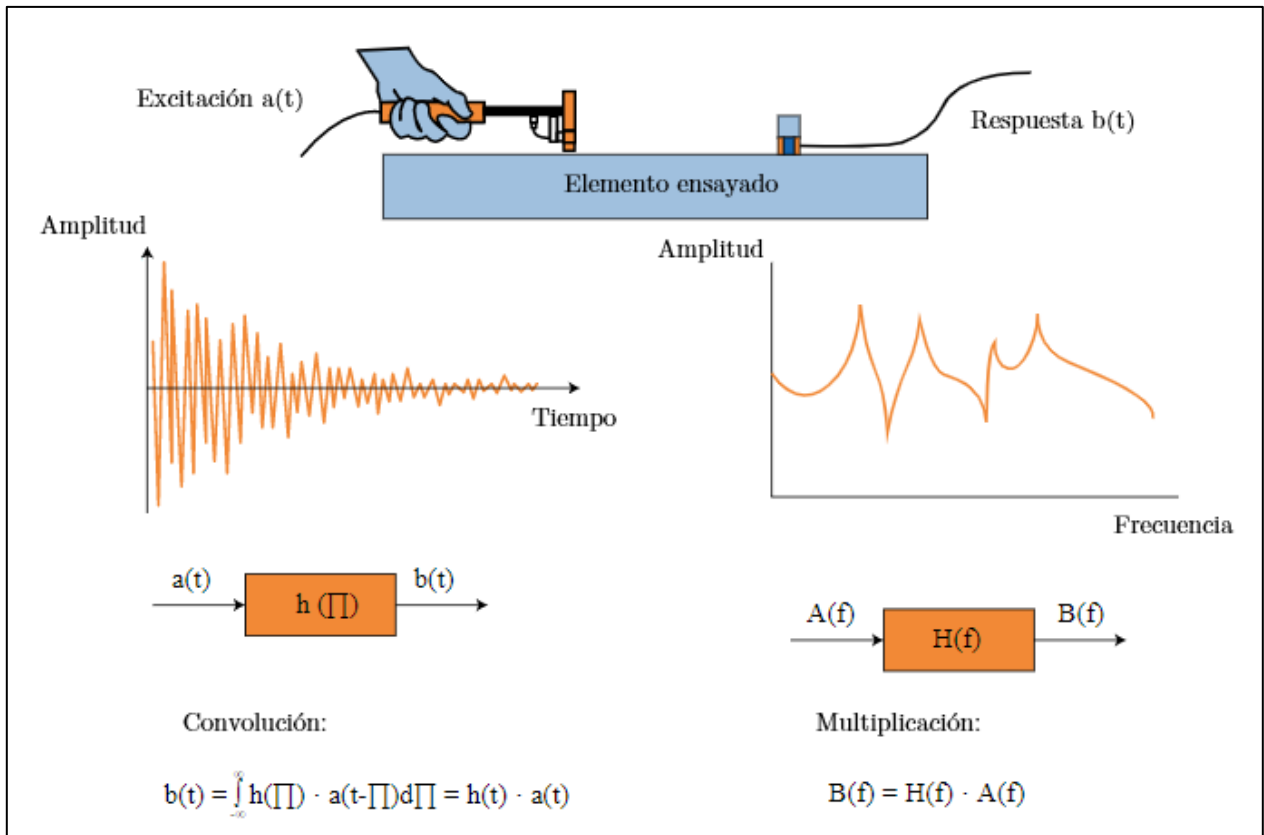


Figura 3.2. Dominio del tiempo y la frecuencia.

Por medio de algoritmos matemáticos y conocimiento avanzado de dinámica de estructuras se implementan métodos de análisis modal que identifiquen las propiedades dinámicas. En la Figura 3.3 se muestra esquemáticamente los distintos métodos de análisis modal que son comúnmente utilizados en la práctica.

En este trabajo de título, se utilizan los métodos ITD, DSI, Espectrograma y función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo, y se implementa la técnica de descomposición del dominio de la frecuencia por pequeñas ventanas para el caso sísmico SMFDD.

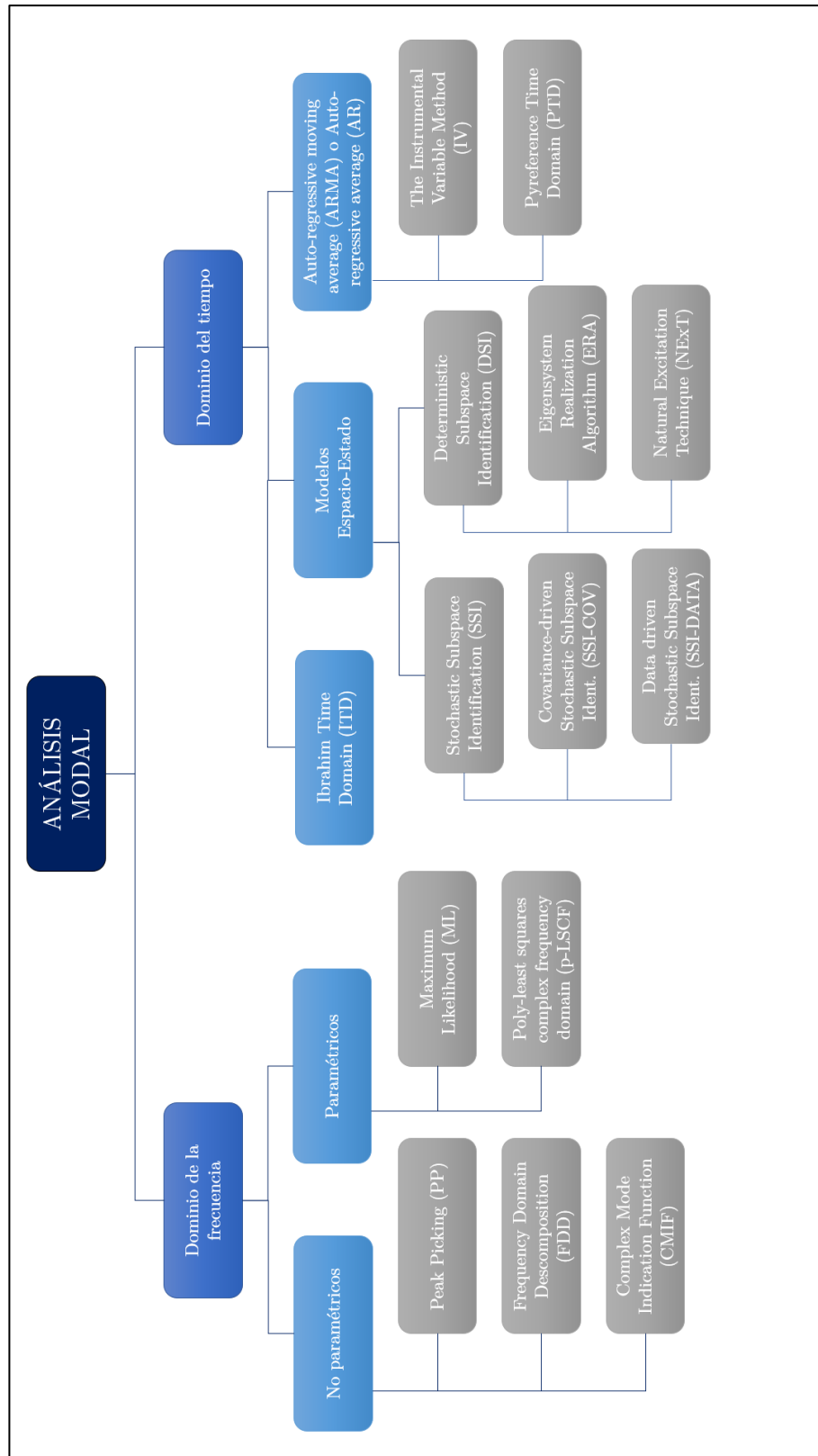


Figura 3.3. Esquema de los Métodos de Análisis Modal. Fuente: (Castro T., 2016).

Capítulo 4

Métodos de análisis modal

4.1. Método de identificación de Ibrahim en el dominio del tiempo (ITD)

4.1.1. Descripción del método ITD utilizado

Los métodos en el dominio del tiempo, a diferencia de los algoritmos en el dominio de frecuencias, utilizan información de la respuesta en el tiempo. Estos algoritmos ajustan los datos a la función de respuesta a un impulso.

El método de Ibrahim (ITD), trata sobre la construcción de problemas de vectores y valores propios a partir de la respuesta en el tiempo del sistema. La solución de estos problemas permite derivar las frecuencias naturales, razones de amortiguamiento y formas modales.

La técnica es descrita por Ibrahim, S.R. and Mikulcik (1976, 1977), cuya deducción del método y las ecuaciones utilizadas, se muestran a continuación.

La ecuación de movimiento de un sistema elástico de n GDL es:

$$[M] \cdot \{\ddot{x}(t)\} + [C] \cdot \{\dot{x}(t)\} + [K] \cdot \{x(t)\} = \{P(t)\} \quad (4.1.1)$$

Donde:

$[M]_{n \times n}$: Matriz de masa.

$[C]_{n \times n}$: Matriz de amortiguamiento.

$[K]_{n \times n}$: Matriz de rigidez.

$\{x(t)\}_{n \times 1}$: Vector de desplazamiento de los GDL.

$\{\dot{x}(t)\}_{n \times 1}$: Primera derivada temporal de $\{x(t)\}_{n \times 1}$, velocidad.

$\{\ddot{x}(t)\}_{n \times 1}$: Segunda derivada temporal de $\{x(t)\}_{n \times 1}$, aceleración.

$\{P(t)\}_{n \times 1}$: Vector de cargas en los GDL.

Despejando la aceleración $\{\ddot{x}(t)\}$ de la ecuación de movimiento y en conjunto con la igualdad $\{\dot{x}(t)\} = \{\dot{x}(t)\}$, se puede expresar la ecuación de equilibrio dinámico en espacio estado, ver Ecuación (4.1.2), la cual es una ecuación diferencial de primer orden del doble de tamaño que la Ecuación (4.1.1).

$$\{\dot{z}(t)\} = [A_c] \cdot \{z(t)\} + \{F(t)\} \quad (4.1.2)$$

Tal que:

$$\{z(t)\} = \begin{Bmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{Bmatrix}; [A_c] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1} \cdot [K] & -[M]^{-1} \cdot [C] \end{bmatrix}; \{F(t)\} = \begin{Bmatrix} [0] \\ [M]^{-1} \cdot [P(t)] \end{Bmatrix}$$

Donde:

$\{z(t)\}_{2 \times n \times t}$: Vector de estado (continuo).

$[A_c]_{2 \times n \times 2 \times n}$: Matriz de estado continua.

$\{F(t)\}_{2 \times n \times t}$: Vector de fuerzas en espacio estado.

La solución de la ecuación diferencial de primer orden en espacio estado es:

$$\{z(t)\} = \left[e^{[A_c] \cdot (t-t_o)} \right] \cdot \{z(t_o)\} + \int_{t_o}^t \left[e^{[A_c] \cdot (t-\tau)} \right] \cdot \{F(\tau)\} d\tau \quad (4.1.3)$$

Se define el vector de observación $\{y(t)\}_{m \times t}$ de m GDL observados como:

$$\{y(t)\} = [C_a] \cdot \{\ddot{x}(t)\} + [C_v] \cdot \{\dot{x}(t)\} + [C_d] \cdot \{x(t)\} \quad (4.1.4)$$

Donde:

$[c_a]_{m \times n}$, $[c_v]_{m \times n}$, $[c_d]_{m \times n}$: Matrices booleanas que identifican los m GDL medidos, estos pueden ser aceleración, velocidad o desplazamiento.

Al despejar la aceleración de la Ecuación (4.1.1) y ser reemplazada en la Ecuación (4.1.4) se obtiene:

$$\{y(t)\} = [C]^{OBS} \cdot \{z(t)\} + [C_d] \cdot [M]^{-1} \cdot \{P(t)\} \quad (4.1.5)$$

Tal que $[C]_{m \times 2 \times n}^{OBS} = \begin{bmatrix} [C_d] - [C_a] \cdot [M]^{-1} \cdot [K] \\ [C_v] - [C_a] \cdot [M]^{-1} \cdot [C] \end{bmatrix}^T$ relaciona los datos observados con el vector espacio estado.

En el caso que la excitación es nula ($\{P(t)\} = \{0\}$) y el sistema solo posee respuesta a condiciones iniciales:

$$\{y(t)\} = [C]^{OBS} \cdot \{z(t)\} \quad (4.1.6)$$

En el caso homogéneo el vector de cargas (Ecuación(4.1.2)) será nulo ($\{F(t)\} = \{0\}$), luego la Ecuación (4.1.2) queda como $\{\dot{z}(t)\} = [A_c] \cdot \{z(t)\}$ y la solución para este caso:

$$\{z(t)\} = [e^{A_c t}] \cdot \{z_o\} \quad (4.1.7)$$

Asumiendo que se impuso una condicional inicial $\{z(0)\} = \{z_o\}$ en $t_o = 0$ (notar que esta condición considera desplazamiento y velocidad inicial).

Las formas modales complejas (con amortiguamiento) ($\{\psi\}_r$) y los polos (λ_r) de un sistema de múltiples GDL se obtienen del problema de valores y vectores propios generalizados obtenidos del caso homogéneo (transformada de Laplace de la ecuación de movimiento) como:

$$(\lambda_r^2 \cdot [M] + \lambda_r \cdot [C] + [K]) \cdot \{\phi\}_r = \{0\} \quad (4.1.8)$$

El problema generalizado posee $2 \cdot n$ formas modales y polos, cada forma y polo posee un correspondiente conjugado. Los vectores modales son llamados alternativamente como vectores modales de desplazamiento.

Al considerar el problema de valores propios y vectores propios de $[A_c]$ se obtiene:

$$(\lambda_r^2 \cdot [M] + \lambda_r \cdot [C] + [K]) \cdot \{\psi_1\}_r = \{0\} \quad (4.1.9)$$

La Ecuación (4.1.9) es idéntica al problema generalizado de valores y vectores propios del caso homogéneo. Entonces los valores propios en ambos casos son los mismos y las primeras n filas del vector propio $[A_c]$ corresponden al vector propio de la Ecuación (4.1.8) ($\{\psi_1\}_r = \{\phi\}_r$).

Se denominan $[\psi]_{2n \times 2n}$ (con su respectiva inversa que satisface $[\psi] \cdot [\psi]^{-1} = [I]$) y $[diag(\lambda)]_{2n \times 2n}$ a la matriz de vectores propios y a la matriz de valores propios de la matriz de estado ($[A_c]$), tal que:

$$([A_c] - \lambda_i \cdot [I]) \cdot \{\psi\}_i = \{0\} \quad (4.1.10)$$

Se expresa el vector de observación desfasado en $s \cdot \Delta t$ (s - desfases de tiempo Δt) obteniendo:

$$\{y(t)\} = [V] \cdot [diag(e^{s \cdot \lambda \cdot \Delta t})] \cdot [diag(e^{\lambda t})] \cdot [D] \quad (4.1.11)$$

Donde:

$$[V]_{m \times 2n} = [C]^{OBS} \cdot [\psi] ; [D]_{2n \times 2n} = [\psi]^\dagger \cdot \{z_o\}$$

Con la finalidad de introducir un conjunto finito de datos que permite minimizar el ruido en el sistema se establece una matriz de respuesta extendida (de tipo Hankel), en la que cada uno de sus elementos es un vector que representa una medición:

$$[y(t)]_{i \times mk} = \begin{bmatrix} \{y(t)\} & \{y(t+\Delta t)\} & \cdots & \{y(t+(h-1)\cdot\Delta t)\} \\ \{y(t+\Delta t)\} & \{y(t+2\cdot\Delta t)\} & \cdots & \{y(t+h\cdot\Delta t)\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \{y(t+(i-1)\cdot\Delta t)\} & \{y(t+i\cdot\Delta t)\} & \cdots & \{y(t+(i+h-2)\cdot\Delta t)\} \end{bmatrix} \quad (4.1.12)$$

La matriz se construye considerando un aumento progresivo de los vectores de respuesta, en un intervalo de tiempo ($\Delta t = 1/Fs$) tanto en filas como en columnas (números y tamaño de ventanas de análisis). Donde i es el número de retardos escogidos (por el usuario) para construir la matriz de Hankel. Se escoge de manera que la matriz expandida de respuestas incorpore la totalidad de datos considerados en la ventana de tiempo escogida para la estimación ($h = N_{total} - i + 2$, donde N_{total} es el número de datos contenidos en la ventana escogida).

Volviendo atrás, la respuesta en el tiempo en un punto k , para un instante de tiempo t_j se puede expresar como la suma de respuestas individuales de cada modo:

$$x_k(t_j) = \sum_{r=1}^{2N} \phi_{kr} e^{\lambda_r t_j} \quad (4.1.13)$$

Considerando q puntos de medición y L instantes de tiempo, se tiene que,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t_1) & \cdots & x_1(t_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_q(t_1) & \cdots & x_q(t_L) \end{bmatrix}}_{q \times L} = \underbrace{\begin{bmatrix} \phi_{11} & \cdots & \phi_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{q1} & \cdots & \phi_{q2N} \end{bmatrix}}_{q \times 2N} \underbrace{\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t_1} & \cdots & e^{\lambda_1 t_L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\lambda_{2N} t_1} & \cdots & e^{\lambda_{2N} t_L} \end{bmatrix}}_{2N \times L} \quad (4.1.14)$$

O bien,

$$X = \Phi \Lambda \quad (4.1.15)$$

Donde Λ es una matriz constituida por los elementos $e^{\lambda_k t_j}$. Esta ecuación por si sola es insuficiente para determinar los parámetros modales. Se considera entonces un segundo set de L puntos, desfasados en Δt con respecto al set anterior:

$$x_k(t_j + \Delta t) = \sum_{r=1}^{2N} \phi_{kr} e^{\lambda_r (t_j + \Delta t)} = \sum_{r=1}^{2N} \phi_{kr} e^{\lambda_r \Delta t} e^{\lambda_r t_j} \quad (4.1.16)$$

Definiendo:

$$x_k(t_j)^* = x_k(t_j + \Delta t) \quad (4.1.17)$$

$$\phi_{kr}^* = \phi_{kr} e^{\lambda_r \Delta t} \quad (4.1.18)$$

Siguiendo el mismo procedimiento anterior, se obtiene un segundo set de ecuaciones:

$$X^* = \Phi^* \Lambda \quad (4.1.19)$$

Definiendo una matriz A_s de $q \times q$ con la siguiente propiedad:

$$A_s \Phi = \Phi^* \quad (4.1.20)$$

Premultiplicando la Ecuación (4.1.15) por A_s :

$$A_s X = A_s \Phi \Lambda = \Phi^* \Lambda \quad (4.1.21)$$

Sustituyendo la Ecuación (4.1.9):

$$A_s X = X^* \quad (4.1.22)$$

Si X y X^* son conocidos, A_s se puede despejar como:

$$A_s = X^* X^\dagger \quad (4.1.23)$$

Donde X^\dagger es la pseudoinversa de X y viene dada por: $X^\dagger = X^T (X^T X)^{-1}$ asumiendo que $L > q$.

Recordar que $A_s \Phi_r = \Phi_r^*$, se tiene que:

$$A_s \Phi_r = \Phi_r e^{\lambda_r \Delta t} \quad (4.1.24)$$

$$[A_s - e^{\lambda_r \Delta t} I] \cdot \Phi_r = \{0\} \quad (4.1.25)$$

La ecuación anterior es una ecuación de valores propios. Los modos normales corresponden a los vectores propios y las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento se deducen de los valores propios:

$$e^{\lambda_r \Delta t} = e^{(\sigma_r + j\omega_r) \Delta t} = \alpha_r + j\gamma_r \quad (4.1.26)$$

$$\alpha_r = e^{\sigma_r \Delta t} \cos(\omega_r \Delta t) \quad (4.1.27)$$

$$\gamma_r = e^{\sigma_r \Delta t} \sin(\omega_r \Delta t) \quad (4.1.28)$$

$$\sigma_r = \frac{\ln(\alpha_r^2 + \gamma_r^2)}{2\Delta t} \quad (4.1.29)$$

$$\omega_{dr} = \frac{\arctan\left(\frac{\gamma_r}{\alpha_r}\right)}{\Delta t} \quad (4.1.30)$$

Finalmente, los parámetros dinámicos se obtienen como:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_{dr}^2 + \sigma_r^2} \quad (4.1.31)$$

$$\beta_r = -\frac{\sigma_r}{\sqrt{\omega_{dr}^2 + \sigma_r^2}} \quad (4.1.32)$$

4.2. Método de Identificación Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI)

El DSI que se utiliza en este trabajo se encuentra descrito en la memoria para optar al título de ingeniero civil de Pablo Díaz (2017). A continuación se presentan los principales fundamentos del método.

4.2.1. Descripción del método DSI utilizado

“Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI) es un método espacio estado, que trabaja en tiempo discreto, desarrollado por Van Overschee & De Moor (1996). Este método permite determinar las propiedades dinámicas (frecuencias, razones de amortiguamientos y formas modales) de una estructura a partir de datos de entrada (solicitud o input) y salida (respuesta u output) asumiendo un comportamiento lineal invariante en el tiempo, es decir, no se considera la degradación de rigidez de la estructura, asumiendo que durante el periodo de registro las propiedades dinámicas permanecen constantes” (Díaz, 2017).

El método queda descrito por el siguiente sistema de ecuaciones (Van Overschee, P. & De Moor, 1996):

$$x_{k+1} = A_d \cdot x_k + B_d \cdot u_k + w_k \quad (4.2.1)$$

$$y_k = C_d \cdot x_k + D_d \cdot u_k + v_k \quad (4.2.2)$$

Con w_k y v_k media cero, secuencias de vectores blancos con matriz de covarianza:

$$E \begin{bmatrix} w_p & (w_q^T & v_q^T) \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (4.2.3)$$

Donde:

u_k : Vector de inputs para el instante discreto k . $u_k \in R^m$

y_k : Vector de outputs para el instante discreto k . $y_k \in R^l$

x_k : Vector de estado para el instante discreto k . $x_k \in R^n$

w_k : Vector de ruido que excita al sistema para el instante discreto k . $w_k \in R^n$

v_k : Vector de ruido presente en las mediciones para el instante discreto k . $v_k \in R^l$

A_d : Matriz de estado. $A_d \in R^{n \times n}$

B_d : Matriz de entrada (input). $B_d \in R^{n \times m}$

C_d : Matriz de salida (output). $C_d \in \mathbb{R}^{l \times n}$

D_d : Matriz de transmisión directa. $D_d \in \mathbb{R}^{l \times m}$

\mathcal{Q} , \mathcal{R} , \mathcal{S} : Matrices de covarianza asociadas a w_k y v_k . $\mathcal{Q} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathcal{R} \in \mathbb{R}^{l \times l}$, $\mathcal{S} \in \mathbb{R}^{n \times l}$

En base al sistema de ecuaciones, el problema a resolver dadas las s mediciones consecutivas de inputs y outputs ($k \in \mathbb{Z}^+ / k < s$) es:

- Encontrar el orden del sistema (n).
- Encontrar las matrices del sistema de ecuaciones ($A_d, B_d, C_d, D_d, \mathcal{Q}, \mathcal{R}, \mathcal{S}$).

El sistema de identificación se encuentra representado en la Figura 4.1 en la cual se puede apreciar un modelo de espacio-estado en tiempo discreto, considerando un sistema lineal invariante en el tiempo, con entradas u_k , salidas y_k y estados x_k , descrito por las matrices A_d, B_d, C_d, D_d y las matrices de covarianza $\mathcal{Q}, \mathcal{R}, \mathcal{S}$. En este sistema las señales de entrada y salida son conocidas. El estado no es conocido, pero se determina como resultado del algoritmo del modelo espacio-estado.

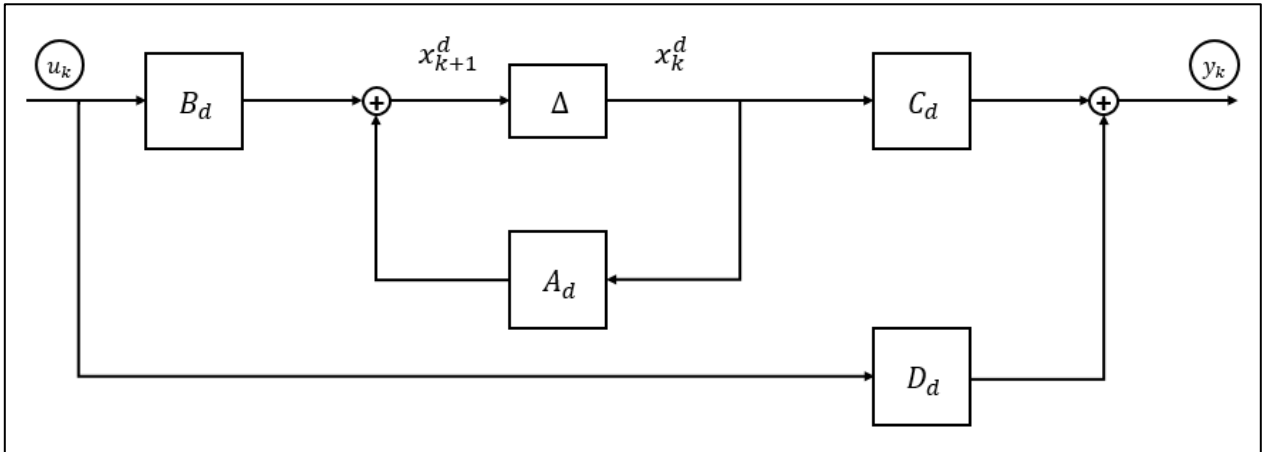


Figura 4.1. Representación gráfica del modelo espacio-estado en tiempo discreto, considerando un sistema lineal invariante en el tiempo. Fuente: (Van Overschee, P. & De Moor, 1996).

Las siguientes ecuaciones resumen el proceso a través del cual el método DSI estima las propiedades dinámicas de la estructura (Astroza, Gutiérrez, Repenning, & Hernández, 2018).

Primero se definen las matrices de Hankel del sistema, las cuales pueden ser construidas a partir de los registros de entradas y salidas. Las matrices de Hankel de entrada son descritas en las Ecuaciones (4.2.4) y (4.2.5) las cuales denotan pasado y futuro, respectivamente, donde cada elemento es una columna del registro de entrada.

$$U_{0|2i-1} = \begin{pmatrix} u_0 & u_1 & u_2 & \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 & u_3 & \cdots & u_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{i-1} & u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-2} \\ u_i & u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & u_{i+3} & \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & u_{2i+1} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{0|i-1} \\ U_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_p \\ U_f \end{pmatrix} \quad (4.2.4)$$

$$Y_{0|2i-1} = \begin{pmatrix} Y_{0|i-1} \\ Y_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (4.2.5)$$

Donde el parámetro i corresponde al número de bloques filas o números de retardos empleados para construir las matrices de Hankel, el cual debería al menos ser mayor que el orden del sistema (n). Para este caso se considera $i-1=2n'$. Para n' representando a los GDL representativos del sistema, asociados a n' componentes principales entendidos como modos de vibrar reales de la estructura, de esta forma existen $n=2n'$ modos de vibrar complejos asociados al sistema espacio-estado.

El valor de j corresponde al número de columnas escogidas para construir una matriz expandida con la totalidad de datos medidos ($j = s - 2i + 1$).

Luego, en la Ecuación (4.2.6)(4.1.6) se calcula la proyección ortogonal de las respuestas pasadas proyectadas en las respuestas futuras condicionadas a sus respectivas entradas, donde se tiene T transpuesta de la matriz.

$$O_i = Y_f /_{U_f} \begin{pmatrix} U_p \\ Y_p \end{pmatrix} \quad ; \quad O_{i+1} = Y_f^- /_{U_f^-} \begin{pmatrix} U_p^\dagger \\ Y_p^\dagger \end{pmatrix} \quad (4.2.6)$$

El orden del sistema se calcula mediante la descomposición de valores singulares:

$$W_1 \cdot O_i \cdot W_2 = U_1 \quad U_2 \cdot \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 \cdot S_1 \cdot V_1^T \quad (4.2.7)$$

Donde W_1, W_2 corresponden a las matrices de peso.

Se calculan las matrices de observabilidad extendida Γ_i y Γ_{i-1} :

$$\Gamma_i = W_1^{-1} \cdot U_1 \cdot S_1^{1/2} \quad (4.2.8)$$

Γ_{i-1} es definido por Γ_i sin las últimas l filas.

Se determinan las secuencias de estado \tilde{X}_i y \tilde{X}_{i+1} , donde se denota por † la pseudo-inversa de la matriz:

$$\tilde{X}_i = \Gamma_i^\dagger O_i \quad ; \quad \tilde{X}_{i+1} = \Gamma_{i+1}^\dagger O_{i+1} \quad (4.2.9)$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones lineales para A_d , B_d , C_d y D_d :

$$\begin{pmatrix} \tilde{X}_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_d & B_d \\ C_d & D_d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{X}_i \\ U_{i|i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_w \\ \rho_v \end{pmatrix} \quad (4.2.10)$$

Se calculan los valores propios μ y vectores propios (Ψ) de la matriz A_d y se determinan las propiedades dinámicas del sistema:

$$f_r = \frac{\sqrt{\lambda_r \cdot \lambda_r^*}}{2\pi} \quad (4.2.11)$$

$$\xi_r = \frac{-\text{Re}(\lambda_r)}{|\lambda_r|} \quad (4.2.12)$$

$$\Phi = C_d \cdot \Psi \quad (4.2.13)$$

$$\lambda_r = \frac{\ln(\mu_r)}{\Delta t} \quad (4.2.14)$$

Detalles y deducciones de las teoremas que explican la metodología se pueden encontrar en Van Overschee, P. & De Moor (1996), F. J. Hernández (2009) y Astroza et al. (2018).

4.2.2. Criterios de estabilidad en la estimación de las propiedades dinámicas

La aplicación del método DSI depende de una serie de parámetros, además de los datos de entrada y salida, establecidos por el usuario. Determinar cómo la variación de aquellos parámetros afecta la estimación de propiedades dinámicas es fundamental.

Algunos de estos parámetros son:

- El orden del sistema (n).
- El número de bloques filas o retardos (i).
- Determinación de los pesos (W_1 y W_2).

F. J. Hernández (2009) estipula que los parámetros dinámicos estimados se tienden a estabilizar para valores altos de números de retardos (i), pero que a mayor (i) disminuye el índice (j), aumentando el error estadístico.

“El orden del sistema se puede estimar a partir de una revisión gráfica de los valores singulares, descartando los valores singulares más bajos, denominando a este valor como el orden efectivo del sistema (n^{ef}). La inclusión de un número mayor de valores singulares no afecta de gran forma a los modos predominantes ($n > n^{ef}$)” (Díaz, 2017).

Para la estabilidad de las propiedades dinámicas se utilizan los diagramas de estabilidad, en los cuales se analiza la estabilidad de los parámetros dinámicos al variar el orden del sistema ($n=i-1$) o equivalentemente el número de retardos (i). Se comparan los parámetros dinámicos entre un orden y el subsiguiente, considerando los siguientes criterios de similitud, cuyos valores pueden variar dependiendo del caso en estudio, junto con lo que sea definido por el usuario.

Criterio de similitud en frecuencia ($cf\%$):

$$\frac{f^{(p)} - f^{(p-1)}}{f^{(p)}} \leq cf\% \quad (4.2.15)$$

Criterio de similitud en factores de amortiguamiento ($cam\%$):

$$\frac{\beta^{(p)} - \beta^{(p-1)}}{\beta^{(p)}} \leq cam\% \quad (4.2.16)$$

Criterio de similitud en MAC :

$$100\% \cdot (1 - MAC(\{\phi_p\}, \{\phi_{p+1}\})) \leq cm\% \quad (4.2.17)$$

$$MAC(\{\phi_p\}, \{\phi_{p+1}\}) = \frac{|\{\phi_p\}^H, \{\phi_{p+1}\}|^2}{(\{\phi_p\}^H \cdot \{\phi_p\}) \cdot (\{\phi_{p+1}\}^H \cdot \{\phi_{p+1}\})} \quad (4.2.18)$$

Donde p corresponde al orden estudiado y $p+1$ al orden siguiente. Con $p \in \{1-Q\}$ donde Q es el orden mayor del sistema empleado para las identificaciones con $Q > M$ o n^{ef} .

En el gráfico de estabilidad, ver Figura 4.2, se definen cuatro tipos de coincidencias, las cuales se representan con símbolos predefinidos:

- Coincidencia simple: en sólo frecuencia (\cdot).
- Coincidencia doble: en frecuencia y razón de amortiguamiento (∇).
- Coincidencia doble: en frecuencia y forma modal (MAC) (Δ).
- Coincidencia triple: en frecuencia, razón de amortiguamiento y forma modal (\oplus).

Si la coincidencia triple es recurrente a medida que se aumenta el orden del sistema, es posible suponer que, para los modos encontrados, la identificación de parámetros dinámicos es estable.

Según Pastor, Binda, & Harčarik (2012) el MAC (Modal Assurance Criterion) es un indicador estadístico que es más sensible a las grandes diferencias y relativamente insensible a las pequeñas diferencias en las formas modales. El MAC considera sólo formas modales, lo que significa que es correcto hacer una comparación de frecuencia por separado junto con los valores del MAC. Está limitado entre 0 y 1, con 1 indica formas de modo totalmente coherentes. Sólo puede indicar consistencia o similitud entre dos formas modales para órdenes consecutivos y no indica validez u ortogonalidad. Un valor cercano a 0 indica que los modos no son coherentes.

El diagrama de estabilidad muestra además el histograma, que contabiliza la cantidad de coincidencias (en frecuencias) en torno a una determinada frecuencia, y el espectro de potencia promedio de una de las señales, ver Figura 4.2.

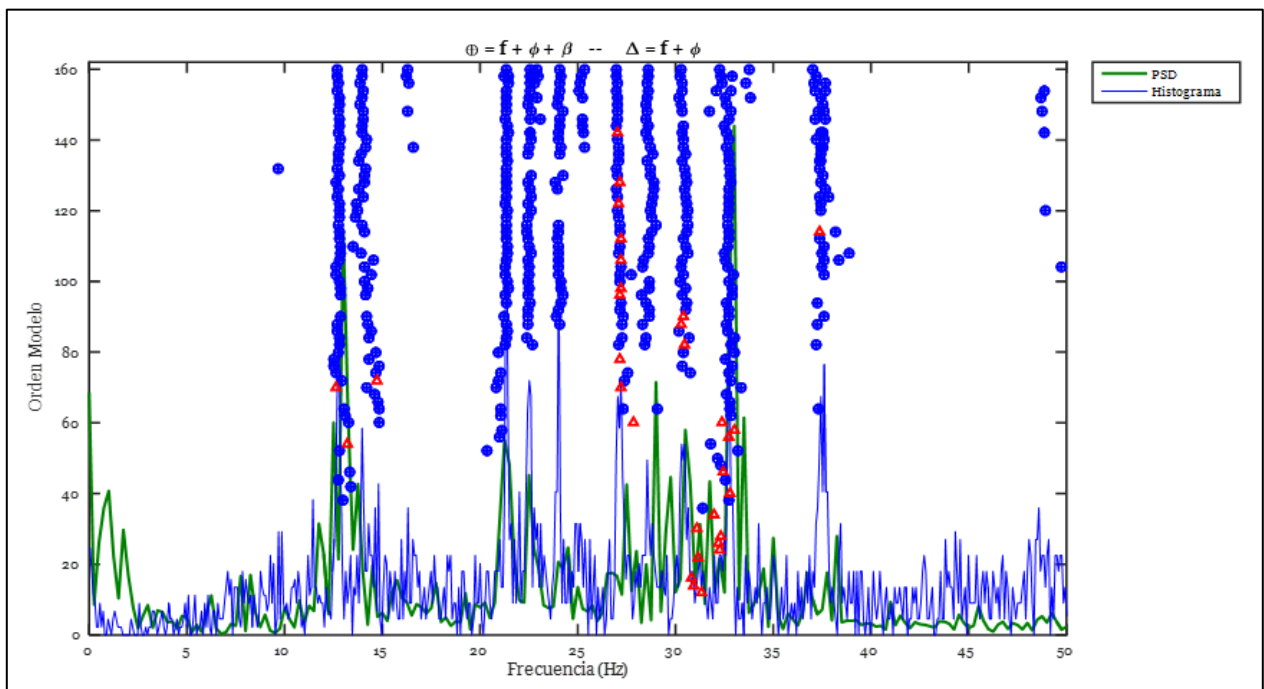


Figura 4.2. Ejemplo de diagrama de estabilidad donde se presentan resultados del método DSI.

4.2.3. Propiedades dinámicas invariantes y variantes en el tiempo

4.2.3.1. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo

“De acuerdo a lo establecido por Gutierrez Lihn (2016) al considerar que las propiedades dinámicas son invariantes en el tiempo, no se considera la degradación de la rigidez de la estructura durante la sollicitación, por lo cual se supone que durante el registro que se analiza las propiedades dinámicas permanecen constantes. Lo anterior puede representar el comportamiento de una estructura sólo en determinados casos, en los cuales la demanda sísmica es baja o no sea capaz de generar degradación en la rigidez de la estructura (vibraciones ambientales o sismos de baja intensidad)” (Díaz, 2017).

Con lo anterior, la identificación de propiedades dinámicas de la estructura puede realizarse empleando sólo una ventana de tiempo que abarque todo el registro de entrada y salida.

4.2.3.2. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo

De la memoria de título de Pablo Díaz (2017) se infiere que la variabilidad de las propiedades dinámicas en el tiempo toma una mayor implicancia y se debe analizar con minuciosidad cuando existe la respuesta de una estructura no-lineal o para el caso en estudio de esta memoria, cuando existe variación de masa de una estructura en el tiempo. Es por ello, que el análisis de datos de respuesta de este tipo de estructuras se realiza comúnmente dividiendo los registros en pequeñas ventanas de tiempo, de tal forma que en cada una de ellas exista una variación limitada de parámetros dinámicos y se pueda suponer propiedades invariantes en el tiempo. Con la consideración que los valores obtenidos tienden a ser los valores representativos durante la ventana en estudio.

En este análisis por pequeñas ventanas de tiempo se seleccionan 3 ventanas para verificar la identificación de modos empleando métodos lineales-elásticos como DSI por una ventana. La ventana inicial o “ventana 1” corresponde a la primera ventana del registro; la “ventana 2” corresponde a una ventana durante el movimiento fuerte del registro, generalmente en la parte central del registro; y la “ventana 3” corresponde a una ventana durante el movimiento débil en la parte final del registro. En base a ellas es posible obtener una visión global y resumida de las posibles variaciones de las propiedades dinámicas de la estructura y verificar si los modos buscados pueden ser identificados. En base a los resultados que arrojen las ventanas, que para este caso serían 3 diagramas de estabilidad, es que se define el orden del sistema para el cual la identificación de propiedades dinámicas es estable.

Establecido el orden del sistema ($2Q$), se estiman las propiedades dinámicas para cada ventana de tiempo, asociadas a un número de retardos Q y a $(Q-1)$. Corresponde realizar un primer filtro de similitud entre los parámetros dinámicos estimados para estos números de retardo, entre iguales ventanas de tiempo, seleccionando solo aquellos que satisfagan los criterios de similitud, los cuales son: similitud de frecuencia de un 94%, similitud de MAC de un 88% y similitud de razón de amortiguamiento de un 90%.

Seguido de lo anterior, se realiza un segundo filtro de similitud, pero esta vez entre ventanas consecutivas, restringiendo la diferencia entre frecuencias, razones de amortiguamiento y similitud entre MAC. Para este último filtro, dependiendo del modo que se quiera identificar, es que se ingresan valores distintos que varían entre el 80% y 98% de similitud con la finalidad de ir identificando la variación temporal de los modos seleccionados. Este criterio, depende del nivel de variabilidad de las propiedades dinámicas del modo analizado entre una pequeña ventana de tiempo y la siguiente.

4.2.4. Largo de ventana de tiempo

Según Pablo Díaz (2017) “Cuando se realiza la identificación de propiedades dinámicas por pequeñas ventanas de tiempo, el largo de la ventana es de gran importancia. Si esta es seleccionada apropiadamente, se espera que entre ventanas consecutivas no exista una gran variación de las propiedades dinámicas”.

Para establecer el largo de la ventana se considera la opción de ventanas de largo mínimo traslapadas establecida por Astroza et al. (2018). Esta opción propone realizar una división de largo constante asociado al largo mínimo permitido por el método de identificación DSI y traslapar estas ventanas en un determinado porcentaje, con la finalidad de obtener el mayor número de ventanas posibles.” (Díaz, 2017).

$$j = s - 2 \cdot i + 1 > 2 \cdot (l + m) \cdot i \quad (4.2.19)$$

$$2 \cdot l \cdot i > n \quad (4.2.20)$$

Donde:

s : Número de datos asociados a la identificación o largo de la ventana de tiempo.

j : Número de columnas escogido para construir una matriz expandida.

i : Números de bloques fila o números de retardo.

l : Número de outputs para cada instante de tiempo.

m : Número de inputs para cada instante de tiempo.

n : Orden del sistema.

En base a la restricción anterior se obtiene:

$$s_{\min} > 2 \cdot (l + m) \cdot i + 2 \cdot i - 1 \quad (4.2.21)$$

De acuerdo a los estudios de Gutierrez Lihn (2016) “Para casos donde las variaciones de energía son mayores, la mejor opción es tener una gran cantidad de ventanas de identificación, lo que proporciona mayor información sobre la respuesta dinámica de la estructura a pesar de que en algunas ocasiones no se encuentra resultados para ventanas específicas.”

Entendiendo que el tamaño de la ventana de tiempo es igual $s_{\min} \cdot F_s$ (donde F_s corresponde a la frecuencia de muestreo de las señales), es posible que la ventana sea de una gran dimensión si se tienen numerosos inputs y outputs ($l+m$). Si la variación de las propiedades dinámicas es abrupta durante aquel ancho de ventana la identificación se ve dificultada y tendría una baja resolución de la variación de las propiedades dinámicas. Este problema puede ser resuelto haciendo un re-muestreo de señales a una frecuencia de muestreo mayor, lo que permite controlar el tamaño de la ventana de análisis.

4.3. Métodos de Identificación en Tiempo-Frecuencia

4.3.1. Espectrograma

El espectrograma es una herramienta en el espacio tiempo-frecuencia que establece un análisis del contenido de frecuencia por medio de una posible distribución de energía de una señal por pequeñas ventanas de tiempo. Dicho de otra forma, el espectrograma estudia la variación del espectro de potencia (PSD) de una señal en torno a una ventana de interés.

El espectro de potencia o PSD se define como el valor cuadrático de la transformada de Fourier de una pequeña ventana de tiempo de la señal (STFT, Short Time Fourier Transform) y matemáticamente se define como:

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int s(\tau) \cdot h(\tau - t) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \right|^2$$

$$= \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int s(\tau) \cdot h(\tau - t) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int s^*(\tau') \cdot h^*(\tau' - t) \cdot e^{-j\omega\tau'} d\tau' \right) \quad (4.3.1)$$

Donde:

$s(t)$: Señal en el tiempo.

$h(t)$: Ventana de tiempo utilizada.

Los espectrogramas son comúnmente representaciones gráficas en 3D de la amplitud del PSD presentado en decibeles (dB) en función del tiempo y la frecuencia, ver Figura 4.3. Donde amplitudes mayores significan mayor contenido de energía. Para efectos de esta memoria se presentan gráficos de tonalidades sobre el plano tiempo-frecuencia para visualizar de mejor forma la distribución de la energía en dicho plano, ver Figura 4.4.

Los resultados presentados en los espectrogramas de esta memoria son acompañados por los gráficos de espectro de potencia (marginal en frecuencia) y la señal analizada, a la izquierda del espectrograma y en la parte superior de este, respectivamente, ver Figura 4.4.

Detalles sobre la deducción de la metodología de esta herramienta es posible encontrarlo en F. J. Hernández (2009).

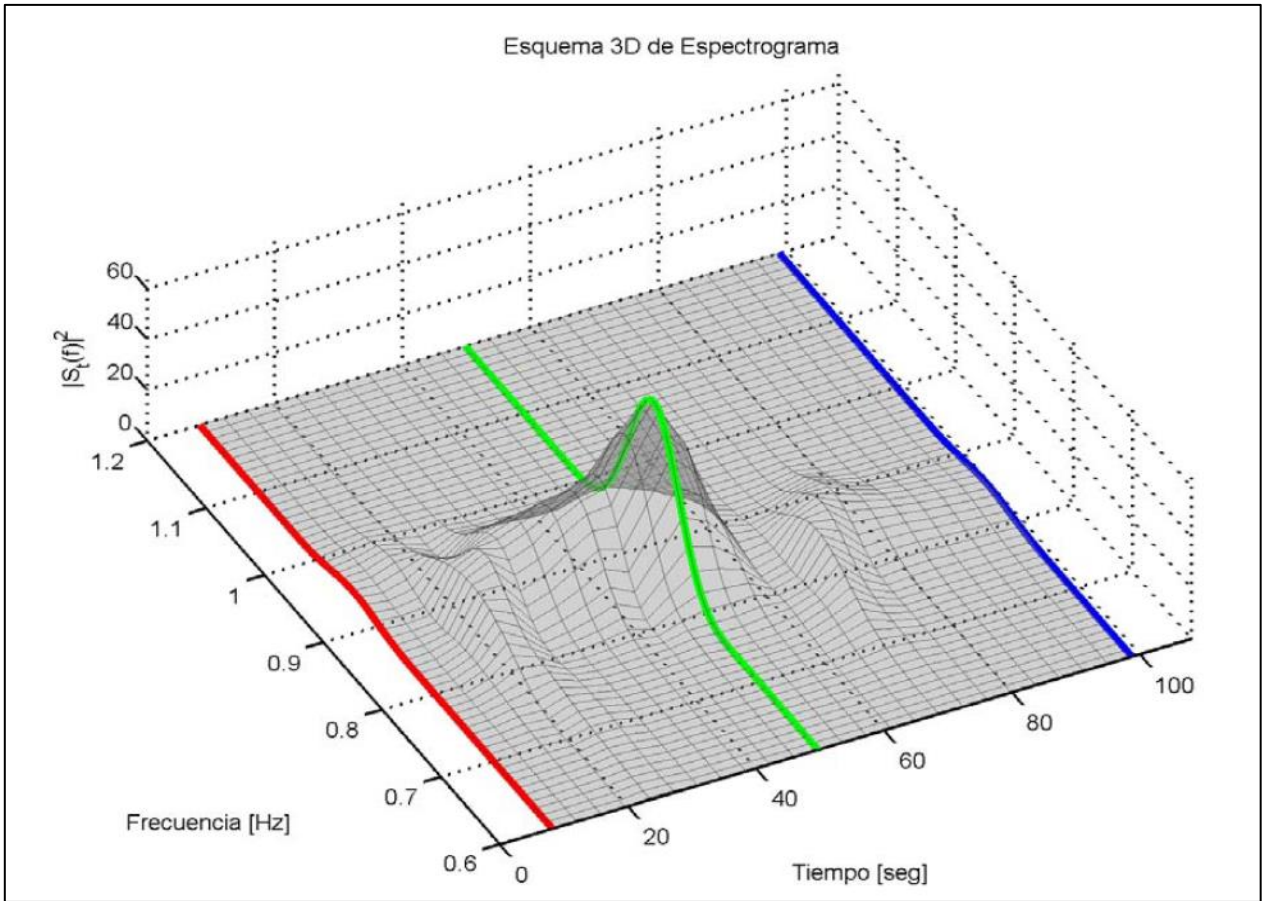


Figura 4.3. Gráfico 3D de Espectrograma. Fuente: (F. J. Hernández, 2009).

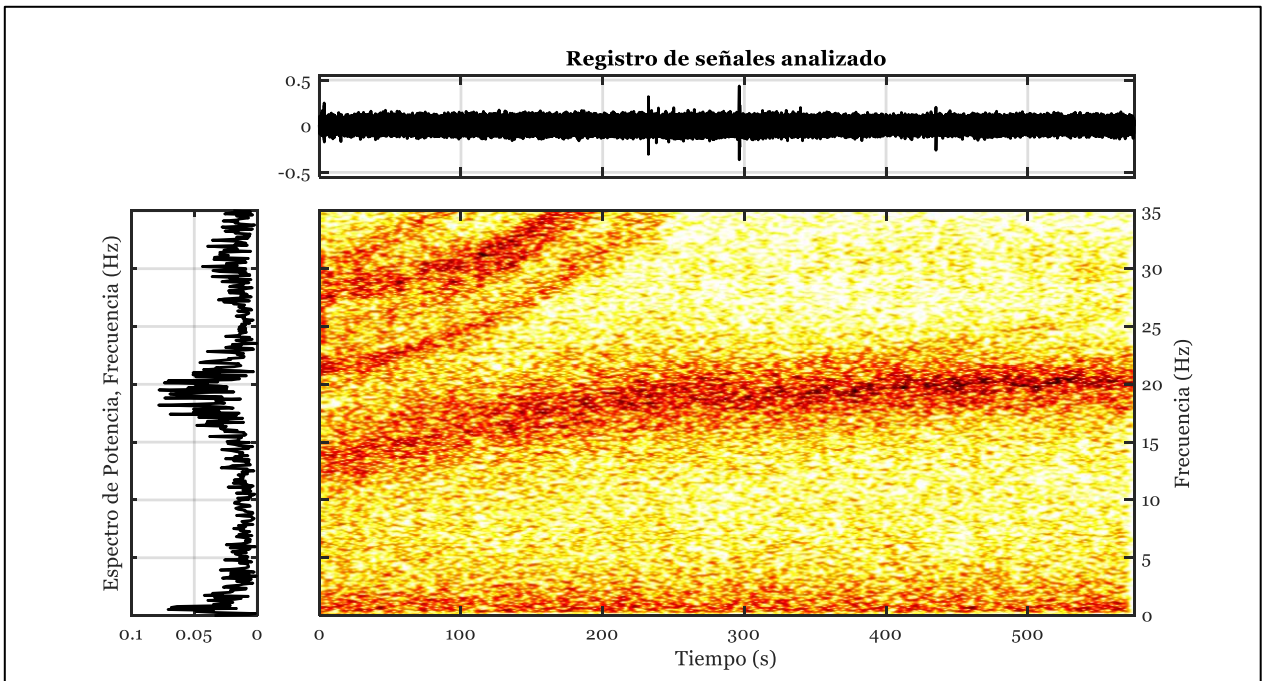


Figura 4.4. Espectrograma de tonalidades en el espacio tiempo-frecuencia.

4.3.2. Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tfTF)

Similar al espectrograma, la Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo realiza un análisis espectral, con la diferencia que esta última considera una relación espectral entre una determinada señal de entrada y de salida. De esta forma, en función de la frecuencia, se logra analizar la amplificación de las señales de salida (outputs) dado una cierta señal de entrada (inputs).

$$H_{\ddot{u}-\ddot{u}_g}(j\omega) = \frac{S_{\ddot{u}_g\ddot{u}}(j\omega)}{S_{\ddot{u}_g}(\omega)} \quad (4.3.2)$$

Donde:

$H_{\ddot{u}-\ddot{u}_g}$: Función de Transferencia.

$S_{\ddot{u}_g\ddot{u}}(j\omega)$: Espectro de potencia cruzado.

$S_{\ddot{u}_g}(\omega)$: Espectro de potencia de la señal de entrada.

Las ventanas utilizadas en esta herramienta son de corta duración del tipo Hanning (similar a las empleadas en el espectrograma). De esta forma se evitan problemas de desdoblamiento (Aliasing) y dispersión (Leakage) (F. J. Hernández, 2009).

Pablo Díaz (2017) detalla en su trabajo de título las ventajas de la Función de transferencia por pequeñas ventanas en comparación con el espectrograma:

- “La función de transferencia es independiente de la amplitud del input u output. Es decir, la función de transferencia es independiente de la potencia local de la señal de entrada. En otras palabras, la función de transferencia se normaliza respecto a la potencia del input.”
- “El registro de aceleraciones totales asociados a un canal dado se compone de la respuesta dinámica de la estructura y de la componente quasi-estática (señal de entrada). Por lo que el espectrograma está fuertemente influenciado por la señal de entrada que está siempre presente en las aceleraciones totales (al menos que se trabaje con aceleraciones relativas) que no guarda relación ninguna con la respuesta estructural.”
- “La función de transferencia por pequeñas ventanas se puede relacionar a diversos inputs. De esta forma la función de transferencia permite analizar la variación de las frecuencias predominantes de la estructura relativas ya sea al nivel basal o al nivel del sistema de aislación. Es decir, la función de transferencia por pequeñas ventanas permite analizar las frecuencias predominantes de la estructura.” Ver Figura 4.5.

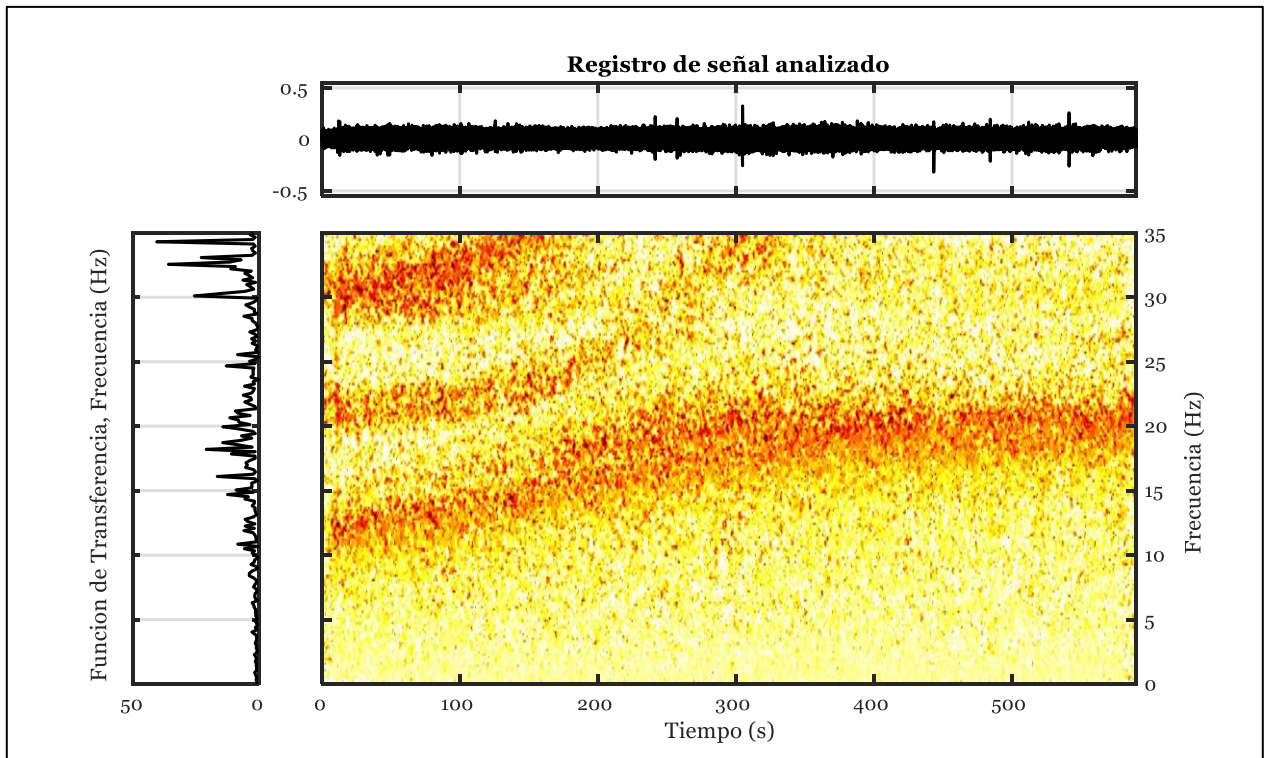


Figura 4.5. Función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tFTF), gráfico de tonalidades en el espacio tiempo-frecuencia.

4.4. Método de identificación a través de la descomposición en el dominio de la frecuencia para el caso sísmico (SMFDD)

4.4.1. Descripción del método Frequency Domain Decomposition para el caso sísmico (SMFDD)

La ecuación que describe la respuesta estructural de aceleraciones en el dominio de la frecuencia dada unas excitaciones arbitrarias con múltiples inputs y múltiples outputs:

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\}_{No \times 1} = [\mathbf{H}(j\omega)]_{No \times Ni} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}_{Ni \times 1} \quad (4.4.1)$$

Tal que:

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}'_1(j\omega) \\ \ddot{u}'_2(j\omega) \\ \vdots \\ \ddot{u}'_{No}(j\omega) \end{Bmatrix}_{No \times 1}, \quad \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{g_1}(j\omega) \\ \ddot{u}_{g_2}(j\omega) \\ \vdots \\ \ddot{u}_{g_{Ni}}(j\omega) \end{Bmatrix}_{Ni \times 1}$$

$$[\mathbf{H}(j\omega)] = \begin{bmatrix} H_{1-g_1}(j\omega) & H_{1-g_2}(j\omega) & \cdots & H_{1-g_{Ni}}(j\omega) \\ H_{2-g_1}(j\omega) & H_{2-g_2}(j\omega) & \cdots & H_{2-g_{Ni}}(j\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{No-g_1}(j\omega) & H_{No-g_2}(j\omega) & \cdots & H_{No-g_{Ni}}(j\omega) \end{bmatrix}$$

Donde:

No : Número de señales de salida u outputs.

Ni : Número de señales de entrada o inputs.

$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\}_{No \times 1}$: Respuesta de aceleración total en el dominio de las frecuencias dado N_o outputs.

$\{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}_{Ni \times 1}$: Aceleración total en el dominio de las frecuencias dado N_i inputs.

$[\mathbf{H}(j\omega)]_{No \times Ni}$: Matriz de transferencia en el dominio de las frecuencias de múltiples entradas y múltiples salidas.

La función $H_{m-gi}(j\omega)$ con $m=1,2,3\dots No$ y $i=1,2,3\dots Ni$ corresponde a la función con valores complejos de la frecuencia ($j\omega$) de excitación dado una sollicitación i -ésima y una respuesta m -ésima (medida), dicho con otras palabras, es la función compleja de la respuesta en frecuencia (FRF), para múltiples input y múltiples outputs.

La función $\ddot{u}_m^t(j\omega)$ con $m=1,2,3\dots No$ define a la transformada de Fourier de la respuesta de aceleración total m -ésima de la estructura en el dominio del tiempo, es decir, corresponde a la respuesta total m -ésima de la estructura en el dominio de las frecuencias.

La función $\ddot{u}_{g_i}(j\omega)$ con $i=1,2,3\dots Ni$ define a la transformada de Fourier de la excitación total i -ésima que es sometida la estructura en el dominio del tiempo, es decir, corresponde a la excitación total i -ésima en el dominio de las frecuencias.

Si la Ecuación (4.4.1) se multiplica por el hermitiano de $\{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}$ se obtiene:

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}^t - \ddot{u}_g}(j\omega) \right]_{No \times Ni} = [\mathbf{H}(j\omega)]_{No \times Ni} \cdot \left[\mathbf{P}_{gg}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni} \quad (4.4.2)$$

Tal que:

$$\left[\mathbf{P}_{gg}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni} = \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}^H \quad (4.4.3)$$

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}^t - \ddot{u}_g}(j\omega) \right]_{No \times Ni} = \{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}^H \quad (4.4.4)$$

Al expandir las matrices de las dos ecuaciones anteriores:

$$\left[\mathbf{P}_{gg}(j\omega) \right] = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{g_1}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_1}^*(j\omega) & \ddot{u}_{g_1}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_2}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}_{g_1}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_{Ni}}^*(j\omega) \\ \ddot{u}_{g_2}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_1}^*(j\omega) & \ddot{u}_{g_2}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_2}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}_{g_2}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_{Ni}}^*(j\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{u}_{g_{Ni}}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_1}^*(j\omega) & \ddot{u}_{g_{Ni}}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_2}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}_{g_{Ni}}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_{Ni}}^*(j\omega) \end{bmatrix} \quad (4.4.5)$$

$$= \begin{bmatrix} P_{g_1g_1}(j\omega) & P_{g_1g_2}(j\omega) & \cdots & P_{g_1g_{Ni}}(j\omega) \\ P_{g_2g_1}(j\omega) & P_{g_2g_2}(j\omega) & \cdots & P_{g_2g_{Ni}}(j\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{g_{Ni}g_1}(j\omega) & P_{g_{Ni}g_2}(j\omega) & \cdots & P_{g_{Ni}g_{Ni}}(j\omega) \end{bmatrix}$$

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}^t - \ddot{u}_g}(j\omega) \right] = \begin{bmatrix} \ddot{u}_1^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_1}^*(j\omega) & \ddot{u}_1^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_2}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}_1^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_{Ni}}^*(j\omega) \\ \ddot{u}_2^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_1}^*(j\omega) & \ddot{u}_2^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_2}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}_2^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_{Ni}}^*(j\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{u}_{No}^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_1}^*(j\omega) & \ddot{u}_{No}^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_2}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}_{No}^t(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_{Ni}}^*(j\omega) \end{bmatrix} \quad (4.4.6)$$

$$= \begin{bmatrix} P_{\ddot{u}'_1 - \ddot{u}_{g_1}}(j\omega) & P_{\ddot{u}'_1 - \ddot{u}_{g_2}}(j\omega) & \cdots & P_{\ddot{u}'_1 - \ddot{u}_{g_{Ni}}}(j\omega) \\ P_{\ddot{u}'_2 - \ddot{u}_{g_1}}(j\omega) & P_{\ddot{u}'_2 - \ddot{u}_{g_2}}(j\omega) & \cdots & P_{\ddot{u}'_2 - \ddot{u}_{g_{Ni}}}(j\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\ddot{u}'_{No} - \ddot{u}_{g_1}}(j\omega) & P_{\ddot{u}'_{No} - \ddot{u}_{g_2}}(j\omega) & \cdots & P_{\ddot{u}'_{No} - \ddot{u}_{g_{Ni}}}(j\omega) \end{bmatrix}$$

Donde:

$[]^H$: Hermitiano, conjugada transpuesta de una matriz.

$[\mathbf{P}_{gg}(j\omega)]_{Ni \times Ni}$: Matriz de potencia de las entradas.

$[\mathbf{P}_{\ddot{u}' - \ddot{u}_g}(j\omega)]_{No \times Ni}$: Matriz de potencia cruzada de salidas-entradas.

$P_{g_i, g_j}(j\omega)$: Espectro de potencia dada las entradas i y k . Con $j=1,2,3,\dots, Ni$.

$P_{\ddot{u}'_m - \ddot{u}_{g_i}}(j\omega)$: Espectro de potencia cruzada dadas las salidas m y las entradas i .

Notar que la diagonal de la Ecuación (4.4.5) corresponde a valores reales que corresponden a los espectros de potencia de las señales de entrada:

$$P_{g_i, g_i}(j\omega) = \ddot{u}_{g_i}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_i}^*(j\omega) = PSD_{g_i} = |\ddot{u}_{g_i}(j\omega)|^2 \quad (4.4.7)$$

Y los valores que no corresponden a la diagonal se definen como el espectro de potencia cruzado (CSD):

$$P_{g_i, g_k}(j\omega) = \ddot{u}_{g_i}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_k}^*(j\omega) = CSD_{g_i, g_k} \quad \forall i \neq k \quad (4.4.8)$$

Dado que la matriz de potencia de las entradas (Ecuación (4.4.3)) es cuadrada de dimensiones $Ni \times Ni$ e invertible, es posible despejar la matriz de transferencia de múltiples salidas y entradas como sigue:

$$[\mathbf{H}(j\omega)]_{No \times Ni} = [\mathbf{P}_{\ddot{u}' - \ddot{u}_g}(j\omega)]_{No \times Ni} \cdot [\mathbf{P}_{gg}(j\omega)]_{Ni \times Ni}^{-1} \quad (4.4.9)$$

Entonces, para efectos del método SMFDD implementado en esta memoria, las señales de entrada y salida obtenidas experimentalmente conducen a obtener la matriz de transferencia, la cual es una propiedad de la estructura.

Luego, tomando nuevamente la Ecuación (4.4.1), pero ahora multiplicándola por su hermitiano se obtiene:

$$[\mathbf{P}_{\ddot{u}' - \ddot{u}'}(j\omega)]_{No \times No} = \{\ddot{\mathbf{u}}'(j\omega)\}_{No \times 1} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}'(j\omega)\}_{1 \times No}^H \quad (4.4.10)$$

Expandiéndola:

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}'-i'}(j\omega) \right]_{No \times No} = \begin{bmatrix} \ddot{u}'_1(j\omega) \cdot \ddot{u}'_1{}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}'_1(j\omega) \cdot \ddot{u}'_{No}{}^*(j\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{u}'_{No}(j\omega) \cdot \ddot{u}'_1{}^*(j\omega) & \cdots & \ddot{u}'_{No}(j\omega) \cdot \ddot{u}'_{No}{}^*(j\omega) \end{bmatrix} \quad (4.4.11)$$

Donde:

$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}'-i'}(j\omega) \right]_{No \times No}$: Matriz de Potencia de las salidas.

Análogo a la Ecuación (4.4.6), la diagonal de la matriz de la Ecuación (4.4.11) corresponde a los espectros de potencia.

Por otra parte, reemplazando la Ecuación (4.4.1) en la Ecuación (4.4.10) se obtiene,

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}'-i'}(j\omega) \right] = [\mathbf{H}(j\omega)] \cdot \underbrace{\{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}^H}_{\left[\mathbf{P}_{gg}(j\omega) \right]} \cdot [\mathbf{H}(j\omega)]^H \quad (4.4.12)$$

Dando como resultado:

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}'-i'}(j\omega) \right]_{No \times No} = [\mathbf{H}(j\omega)]_{No \times Ni} \cdot \left[\mathbf{P}_{gg}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni} \cdot [\mathbf{H}(j\omega)]_{Ni \times No}^H \quad (4.4.13)$$

Con esto se observa que es posible estimar la matriz de potencia de la respuesta en función de la matriz de función de transferencia, $[\mathbf{H}(j\omega)]$, y de la matriz de potencia de las entradas. En particular, dado que se estima la matriz de función de transferencia para los datos de entrada y salida medidos, se puede estimar la matriz de potencia de las salidas para cualquier otro tipo de excitación (o matriz de potencia de excitación).

En caso que se suponga un ruido blanco como entrada sísmica sólo para el i -ésimo input y para el resto de las entradas sin excitaciones. Es decir, $P_{g_i g_i}(j\omega) = \ddot{u}_{g_i}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_i}^*(j\omega) = 1$ y $P_{g_i g_j}(j\omega) = \ddot{u}_{g_i}(j\omega) \cdot \ddot{u}_{g_j}^*(j\omega) = 0 \quad \forall j \neq i$, en forma peyorativa, se entiende que un ruido blanco genera la misma cantidad de energía para cada frecuencia.

Escribiendo lo anterior de forma matricial:

$$\left[\mathbf{P}_{\tilde{g}_i \tilde{g}_i}(j\omega) \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & P_{g_i g_i}(j\omega) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4.14)$$

Donde:

$\left[\mathbf{P}_{\tilde{g}_i \tilde{g}_i}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni}$: Matriz de potencia de entradas para el caso de input sísmico ruido blanco en el i -ésimo input.

Luego, utilizando la Ecuación (4.4.13) la matriz de potencia de las salidas debido a una excitación de ruido blanco en su i -ésima entrada será,

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}^t - \ddot{u}^t}(j\omega) \right]_{No \times No} = [\mathbf{H}(j\omega)]_{No \times Ni} \cdot \left[\mathbf{P}_{\ddot{g}_i \ddot{g}_i}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni} \cdot [\mathbf{H}(j\omega)]_{Ni \times No}^H \quad (4.4.15)$$

Donde:

$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}^t - \ddot{u}^t}(j\omega) \right]_{No \times No}$: Matriz de Potencia de salidas para el caso de input sísmico ruido blanco en el i -ésimo input.

Asumiendo, que se conoce la matriz de transferencia de la estructura $[\mathbf{H}(j\omega)]$, es directo ver que la matriz de potencia de respuesta debido a una excitación de ruido blanco en el i -ésimo input, $\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}^t - \ddot{u}^t}(j\omega) \right]$, puede ser directamente calculada.

Por otra parte, siempre bajo el supuesto que el sistema es lineal, la respuesta de un sistema de Nm GDL será la combinación lineal de la respuesta del espacio modal $\{\ddot{y}^t(t)\}$ con sus modos asociados $\{\phi_j\}$ y está definido en la siguiente ecuación:

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(t)\} = \sum_{j=1}^{Nm} \{\phi_j\} \cdot \ddot{y}_j^t(t) = [\mathbf{\Phi}] \cdot \{\ddot{\mathbf{y}}^t(t)\} \quad (4.4.16)$$

Suponiendo un sismo armónico en la i -ésima entrada con frecuencia $\bar{\omega}$, la respuesta permanente de aceleración total queda determinada por las Ecuaciones (4.4.17) y (4.4.18).

$$\ddot{y}_i^t(t) = A_i(\bar{\omega}) \cdot \cos(\bar{\omega}t - \phi_i) \quad (4.4.17)$$

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(t)\} = \sum_{j=1}^{Nm} \{\phi_j\} \cdot \ddot{y}_j^t(t) = \sum_{j=1}^{Nm} \{\phi_j\} \cdot A_j(\bar{\omega}) \cdot \cos(\bar{\omega}t - \phi_j) \quad (4.4.18)$$

Dado que todas las respuestas modales se describen por la frecuencia de excitación $\bar{\omega}$, se tiene que la respuesta total permanente puede ser descrita reagrupando los términos como la multiplicación de una única forma modal y una respuesta con cierta amplitud y fase:

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(t)\} = \{\tilde{\phi}(\bar{\omega})\} \cdot \mathbf{B}(\bar{\omega}) \cdot \cos(\bar{\omega}t - \tilde{\phi}) \quad (4.4.19)$$

Donde:

$\{\tilde{\phi}(\bar{\omega})\}$: Forma que toma la estructura sujeta a una o varias excitaciones armónicas de frecuencia $\bar{\omega}$.

En el caso que la excitación exista solo en el input i -ésimo, la respuesta en el régimen permanente estaría descrita por una forma que toma la estructura sujeta a una entrada i -ésima para cada frecuencia, $\{\tilde{\phi}_{g_i}(\bar{\omega})\}$.

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(t)\} = \{\tilde{\phi}_{g_i}(\bar{\omega})\} \cdot \mathbf{B}_{g_i}(\bar{\omega}) \cdot \cos(\bar{\omega}t - \tilde{\phi}_{g_i}) \quad (4.4.20)$$

De esta forma la respuesta en el espacio de la frecuencia será:

$$\begin{aligned}\{\tilde{\mathbf{u}}^i(j\omega)\} &= \{\tilde{\phi}_{g_i}(\bar{\omega})\} \cdot \mathbf{B}_{g_i}(\bar{\omega}) \cdot (0.5 \cdot \delta(\omega - \bar{\omega}) \cdot e^{-\sqrt{-1} \cdot \phi_{g_i}} + 0.5 \cdot \delta(\omega + \bar{\omega}) \cdot e^{-\sqrt{-1} \cdot \phi_{g_i}}) \\ &= \{\tilde{\phi}_{g_i}(\bar{\omega})\} \cdot \mathbf{As}(\omega)\end{aligned}\quad (4.4.21)$$

En forma análoga y entendiendo que una excitación de ruido blanco en la i -ésima entrada se puede entender como una señal aleatoria (infinita) que tiene igual energía en todas las frecuencias, se tiene que,

$$\left[\mathbf{P}_{\tilde{u}^i - \tilde{u}^i}(j\omega) \right] = \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\} \cdot \mathbf{Vs}(\omega) \cdot \mathbf{Vs}^*(\omega) \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\}^H \quad (4.4.22)$$

$$\left[\mathbf{P}_{\tilde{u}^i - \tilde{u}^i}(j\omega) \right] = \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\} \cdot |\mathbf{Vs}(\omega)|^2 \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\}^H \quad (4.4.23)$$

Lo anterior indica que si se aplica Descomposición de Valores Singulares (SVD) a la matriz $\left[\mathbf{P}_{\tilde{u}^i - \tilde{u}^i}(j\omega) \right]$ se obtendrá un único valor singular. Lo que implica que la forma que toma la estructura sujeta a un ruido blanco en la entrada i -ésima es única, $\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)$.

Dado que $|\mathbf{Vs}(\omega)|$ representa un factor de amplificación de la estructura asociada a la forma que adopta la estructura cuando es excitada por excitación armónica de frecuencia ω , se debe normalizar la forma modal tal que (esto hace que si $|\mathbf{Vs}(\omega)|$ fuese constante, se cumplirá que $\left[\mathbf{P}_{\tilde{u}^i - \tilde{u}^i}(j\omega) \right]$ también lo será, i.e., no hay amplificación),

$$\tilde{\phi}_{g_i}(\omega) = \frac{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)}{\sqrt{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)^H \cdot \tilde{\phi}_{g_i}(\omega)}} \quad (4.4.24)$$

En la medida que la frecuencia de la excitación coincida con una de las frecuencias naturales de la estructura, $\omega = \omega_{n_j}$, se observará un valor peak de $|\mathbf{Vs} \ \omega|$ y por tanto la forma que adopta la estructura $\tilde{\phi}_j = \tilde{\phi}_{g_i}(\omega = \omega_{n_j})$ será muy similar a la forma modal de la estructura para este modo j -ésimo (al ser el dominante en esta frecuencia), $\phi_j = \tilde{\phi}_{g_i}(\omega = \omega_{n_j})$.

En consecuencia, se determinan de la inspección del grafico $|\mathbf{Vs}(\omega)|$ vs ω las frecuencias que amplifican la respuesta asociada a un ruido blanco en la entrada i -ésima que se relacionaran a Nm frecuencias naturales y formas modales. Con lo que se puede construir la matriz de formas modales,

$$[\Phi] = [\phi_1, \dots, \phi_{Nm}] \quad (4.4.25)$$

Donde se debe normalizar las formas modales tal que,

$$\phi_j = \frac{\phi_j}{\sqrt{\phi_j^H \cdot \phi_j}} \quad (4.4.26)$$

Volviendo a la Ecuación (4.4.16), la respuesta de la estructura en el espacio de las frecuencias queda como:

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\} = [\mathbf{\Phi}] \cdot \{\ddot{\mathbf{y}}^t(j\omega)\} \quad (4.4.27)$$

Reemplazándola en la Ecuación (4.4.10) se obtiene:

$$\begin{aligned} [\mathbf{P}_{\ddot{u}^t-\ddot{u}^t}(j\omega)] &= \{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\}^H \\ &= [\mathbf{\Phi}] \cdot \{\ddot{\mathbf{y}}^t(j\omega)\} \cdot ([\mathbf{\Phi}] \cdot \{\ddot{\mathbf{y}}^t(j\omega)\})^H \\ &= [\mathbf{\Phi}] \cdot \underbrace{\{\ddot{\mathbf{y}}^t(j\omega)\} \cdot \{\ddot{\mathbf{y}}^t(j\omega)\}^H}_{[\mathbf{P}_{\ddot{y}^t\ddot{y}^t}(j\omega)]} \cdot [\mathbf{\Phi}]^H \end{aligned} \quad (4.4.28)$$

Obteniendo:

$$[\mathbf{P}_{\ddot{u}^t-\ddot{u}^t}(j\omega)] = [\mathbf{\Phi}] \cdot [\mathbf{P}_{\ddot{y}^t\ddot{y}^t}(j\omega)] \cdot [\mathbf{\Phi}]^H \quad (4.4.29)$$

Donde:

$[\mathbf{P}_{\ddot{y}^t\ddot{y}^t}(j\omega)]$: Matriz de potencia de las aceleraciones absolutas modales.

Si se supone que existe una entrada de ruido blanco en la entrada i -ésima y teniendo en cuenta las Ecuaciones (4.4.23) y (4.4.29) se tiene,

$$[\mathbf{\Phi}] \cdot [\mathbf{P}_{\ddot{y}\ddot{y}}(j\omega)] \cdot [\mathbf{\Phi}]^H = |Vs(\omega)|^2 \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\} \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\}^H \quad (4.4.30)$$

Donde:

$[\mathbf{P}_{\ddot{y}\ddot{y}}(j\omega)]$: Matriz de potencia de las aceleraciones absolutas modales sujetas a un ruido blanco en la entrada i -ésima.

$$\left[\mathbf{P}_{\tilde{y}\tilde{y}}(j\omega) \right] = \begin{bmatrix} \tilde{y}'_1 \cdot \tilde{y}'_1{}^* & \tilde{y}'_2 \cdot \tilde{y}'_1{}^* & \cdots & \tilde{y}'_1 \cdot \tilde{y}'_{Nm}{}^* \\ \tilde{y}'_2 \cdot \tilde{y}'_1{}^* & \tilde{y}'_2 \cdot \tilde{y}'_2{}^* & \cdots & \tilde{y}'_2 \cdot \tilde{y}'_{Nm}{}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{y}'_{Nm} \cdot \tilde{y}'_1{}^* & \tilde{y}'_{Nm} \cdot \tilde{y}'_2{}^* & \cdots & \tilde{y}'_{Nm} \cdot \tilde{y}'_{Nm}{}^* \end{bmatrix} \quad (4.4.31)$$

Por último, despejando la matriz $\left[\mathbf{P}_{\tilde{y}\tilde{y}} \right]$ de la Ecuación (4.4.32):

$$\left[\mathbf{P}_{\tilde{y}\tilde{y}}(\omega) \right] = |Vs(\omega)|^2 \cdot ([\Phi]^H [\Phi])^{-1} \cdot [\Phi]^H \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\} \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\}^H \cdot [\Phi] \cdot ([\Phi]^H [\Phi])^{-1} \quad (4.4.32)$$

De esta forma la diagonal de $\left[\mathbf{P}_{\tilde{y}\tilde{y}}(\omega) \right]$ corresponde al espectro de potencia del modo j -ésimo dado que existe una entrada de ruido blanco en la entrada i -ésima. Es decir, corresponde a la función de transferencia asociado a la componente modal j -ésimo dada una entrada i -ésima.

El siguiente cuadro corresponde a un esquema que resume el proceso a través por el cual es posible, con el método SMFDD, determinar las propiedades dinámicas de la estructura a partir de los datos de entrada (inputs) y salida (outputs).

1. Conocer un set de entradas y salidas:

$$\{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{g_1}(j\omega) \\ \ddot{u}_{g_2}(j\omega) \\ \vdots \\ \ddot{u}_{g_{Ni}}(j\omega) \end{Bmatrix}_{Ni \times 1} \quad \wedge \quad \{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}'_1(j\omega) \\ \ddot{u}'_2(j\omega) \\ \vdots \\ \ddot{u}'_{No}(j\omega) \end{Bmatrix}_{No \times 1}$$

Ni : Número de inputs.

No : Número de outputs.

2. Construir la matriz de potencia cruzada de salida y entrada, y la matriz de potencia de entradas:

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}'^t - \ddot{u}_g}(j\omega) \right]_{No \times Ni} = \{\ddot{\mathbf{u}}^t(j\omega)\} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}^H \quad \wedge \quad \left[\mathbf{P}_{gg}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni} = \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\} \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}_g(j\omega)\}^H$$

3. Calcular la matriz de transferencia:

$$\left[\mathbf{H}(j\omega) \right]_{No \times Ni} = \left[\mathbf{P}_{\ddot{u}'^t - \ddot{u}_g}(j\omega) \right]_{No \times Ni} \cdot \left[\mathbf{P}_{gg}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni}^{-1}$$

4. Para cada entrada i -ésima realizar los siguientes pasos:

4.1. Obtener la matriz de potencia de salidas considerando como excitación ruido blanco en la entrada i -ésima:

$$\left[\mathbf{P}_{\ddot{u}'^t - \ddot{u}'^t}(j\omega) \right]_{No \times No} = \left[\mathbf{H}(j\omega) \right]_{No \times Ni} \cdot \left[\mathbf{P}_{\tilde{g}_i \tilde{g}_i}(j\omega) \right]_{Ni \times Ni} \cdot \left[\mathbf{H}(j\omega) \right]_{Ni \times No}^H$$

4.2. Realizar Descomposición de Valores Singulares (SVD) de $[\mathbf{P}_{\tilde{u}'-\tilde{u}'}(\omega)]$:

$$[\mathbf{P}_{\tilde{u}'-\tilde{u}'}(\omega)] = \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\} \cdot |Vs(\omega)|^2 \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\}^H$$

$\{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\}$: Vector propio, que se refiere a la forma que adopta la estructura debido a una entrada armónica en la entrada i -ésima. El vector propio se debe normalizar tal que

$$\tilde{\phi}_{g_i} = \tilde{\phi}_{g_i} / \sqrt{\tilde{\phi}_{g_i}^H \cdot \tilde{\phi}_{g_i}}.$$

$|Vs(\omega)|^2$: Valor propio, que se relaciona a la amplificación generada por la forma modal que adopta la estructura para la frecuencia ω debido a una entrada armónica en la entrada i -ésima.

(Se tiene un único valor y vector singular de este problema)

4.3. Graficar para cada input:

$$\sqrt{|Vs(\omega)|^2} \quad \text{v/s Frecuencia } (\omega).$$

4.4. Del gráfico de $\sqrt{|Vs(\omega)|^2}$ se obtienen los peaks asociados a los modos que dominan el movimiento sísmico que se asociarán a las frecuencias naturales de la estructura ω_{n_j} a través de inspección que serán $j = 1, 2, 3, \dots, Nm$ peaks. Además, para los peaks, se supone que las formas modales de la estructura corresponden a la forma que adopta la estructura para dicha frecuencia:

$$\{\phi_j\} = \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega = \omega_{n_j})\}$$

4.5. Normalizar las formas modales encontradas asociadas a la respuesta de la estructura cuando se ve sujeta a una entrada de ruido blanco en su entrada i -ésima:

$$\phi_j = \frac{\phi_j}{\sqrt{\phi_j^H \cdot \phi_j}}$$

4.6. Construir la matriz de formas modales que dominan el movimiento,

$$[\Phi] = [\phi_1, \dots, \phi_{Nm}]$$

4.7. Construir matriz de potencia de las aceleraciones absolutas modales sujetas a un ruido blanco en la entrada i -ésima:

$$[\mathbf{P}_{\tilde{y}\tilde{y}}] = |Vs(\omega)|^2 \cdot ([\Phi]^H [\Phi])^{-1} \cdot [\Phi]^H \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\} \cdot \{\tilde{\phi}_{g_i}(\omega)\}^H \cdot [\Phi] \cdot ([\Phi]^H [\Phi])^{-1}$$

4.8. Finalmente, graficar el PSD de cada modo (diagonal de $[\mathbf{P}_{\ddot{y}\ddot{y}}]$) que se refiere al espectro de potencia (función de transferencia) asociado a cada modo j -ésimo debido a una acción del tipo ruido blanco en la entrada i -ésima.

En la medida que el análisis de los resultados se genere por pequeñas ventanas de tiempo es posible generar una representación tiempo-frecuencia asociado al espectro de potencia (i.e., función de transferencia) asociada a cada modo j -ésimo debido a una acción del tipo ruido blanco en la entrada i -ésima. De esta forma, se pueden encontrar componentes de frecuencias cercanas en la medida que la forma que predomina para cada entrada estén controladas por componentes sísmicas distintas y/o a través de la descomposición modal de la respuesta a cada entrada.

Cabe mencionar que la técnica de peak-peaking (i.e., la identificación de las formas modales) puede ser obviada si se han identificado las formas modales de la estructura (a partir de otro método o si se supone que la forma modal no varía y es igual a la observada en la primera ventana de datos). En tal caso, la descomposición es efectiva incluso si la respuesta asociada a una excitación j -ésima se describe por dos modos de frecuencias cercanas.

Se observa que la respuesta estructural asociada a un input se relaciona a una única forma que varía conforme a la frecuencia.

Capítulo 5

Ensayos en Laboratorio

Se realiza un ensayo modal para identificar las propiedades dinámicas de un estanque semicilíndrico que almacena líquido. Para ello, es necesario realizar ensayos experimentales con condiciones controladas, variación de parámetros (masa de la estructura en el tiempo) y dispositivos usuales de instrumentación como lo son acelerómetros, sensores ultrasónicos y cámaras de video.

Los ensayos son realizados mediante la utilización de la mesa vibradora perteneciente al Laboratorio de Sólidos, ubicado en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

5.1. Descripción de Estructura

5.1.1. Sistema principal

La estructura principal consiste en un estanque de HDPE (High Density Polyethylene) color azul, semicilíndrico con capacidad de 220 litros, de 90 cm de alto y un diámetro promedio de 58 cm, llamado desde ahora “estanque principal”, ver Figura 5.1. El estanque se empotra a la mesa de vibrar a través de una placa base de madera de 2 centímetros de espesor, por medio de una abrazadera de acero A36 fabricada “a la medida”, ver Figura 5.2. La placa base es apernada a la superficie de la mesa vibradora, además, como acción preventiva, la mesa es cubierta con nylon para evitar posibles daños que se pudiesen generar debido a presuntos derrames de líquido.

En la Tabla 5.1 se resumen las principales propiedades del estanque principal.

Tabla 5.1. Especificaciones estructura principal.

Altura	90 cm	Material	HDPE
Diámetro promedio	58 cm	Material placa base	Madera
Espesor	3 mm	Espesor placa base	20 mm
Módulo de elasticidad* (E)	1000 Mpa		

* Fuente: www.designerdata.com/Plastics/HDPE



Figura 5.1. Estanque principal.

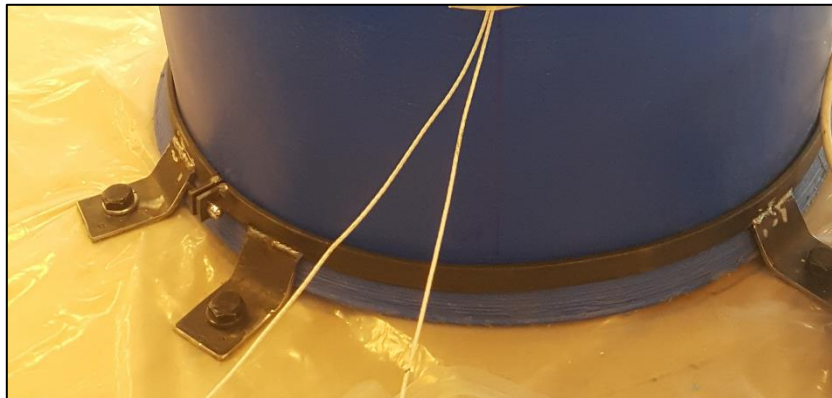


Figura 5.2. Abrazadera de acero "a la medida" apernada en placa base.

El estanque principal fue cubierto por una tapa de acrílico transparente del mismo diámetro que el estanque de 1,5 cm de espesor. La tapa de acrílico fue confeccionada luego de extraer la original de HDPE para garantizar el ingreso de luz. Por el canto de la tapa se utilizó un sellante de polietileno que inhibe el derrame del fluido a través del perímetro. A la tapa acrílica transparente se le instaló un soporte metálico para apernar hasta 3 cámaras de video GoPro con el fin de obtener registros visuales del movimiento del fluido al interior del estanque durante los ensayos sísmicos. Adicionalmente, fueron instalados los soportes para la colocación de focos de iluminación; por otra parte, contiene 3 orificios

de 2 cm de diámetro para el posicionamiento de los sensores ultrasónicos y un orificio de 8 cm de diámetro donde está colocado un tapón hembra de PVC con rosca de 3" que es utilizado para el llenado del estanque, ver Figura 5.3.

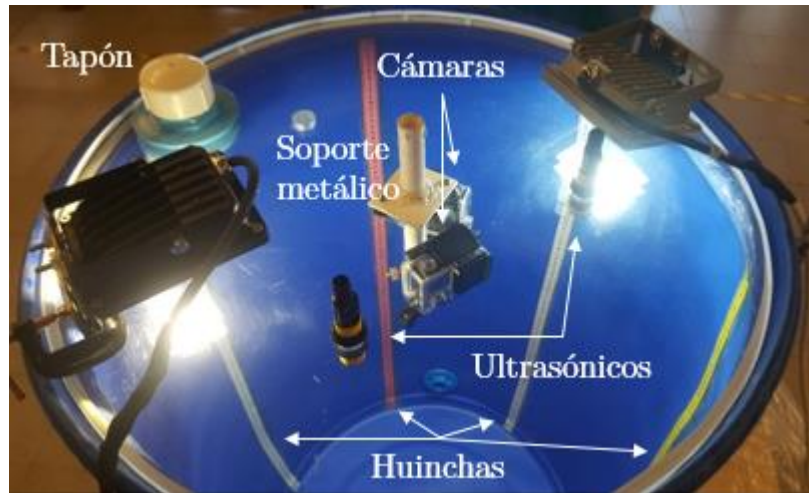


Figura 5.3. Tapa de acrílico e interior de Estanque principal.

En el interior del estanque principal, se adhieren 6 cintas métricas de costurera orientadas verticalmente y dispuestas cada 60 grados aprox., niveladas a 85 cm de la base del estanque, con el fin de leer la altura de ola para el ensayo que lo amerite además de poder realizar estimaciones del nivel de llenado del estanque, ver Figura 5.3.

En la parte inferior del estanque a 9 cm de su base, se instala una válvula de bola de compuerta de diámetro $\frac{3}{4}$ ", ver Figura 5.4, que regula y controla la salida del fluido que se almacena en él, es decir, controla la variación de masa del sistema.

Dado todo lo anterior, se tiene que la masa inicial del sistema principal estando ya instrumentado y sin líquido en su interior se resume en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Masa de elementos del estanque principal

Conjunto de elementos	Masa (kg)	Precisión (kg)
Placa base de madera y pernos pasantes	17,365	$\pm 0,005$
Tambor principal, tapa de acrílico, abrazadera de acero y focos de iluminación	15,200	$\pm 0,005$
Sensores	0,225	$\pm 0,002$
TOTAL	32,790	$\pm 0,0074$



Figura 5.4. Válvula de salida de estanque principal.

5.1.2. Sistema secundario

Complementariamente, se generó un sistema de llenado y vaciado del fluido que se almacena en el estanque principal. Este se compone de los siguientes elementos que se detallan a continuación y se muestran en las Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7.

5.1.2.1. Elementos del sistema de almacenamiento

1. Manguera de salida longitud 2 m y diámetro $\frac{3}{4}$ "', conectada a la válvula de salida, conduce el fluido a un nuevo estanque de almacenamiento, desde ahora, estanque secundario.
2. Medidor de agua A, conectado aguas debajo de la manguera de salida, mide el caudal y el volumen de fluido que conduce dicha manguera al estanque secundario.
3. Tubo de PVC de una longitud de 90 cm y de diámetro de 1"', conectado aguas abajo del medidor y su función principal es cambiar la cota de salida (energía potencial o gradiente de Bernoulli).
4. Estanque secundario, similares características del estanque principal, almacena el fluido que abandona el estanque principal.

5.1.2.2. Elementos del sistema de restitución

5. Bomba recirculadora y manguera, eleva la columna del fluido que se encuentra acumulado en el estanque secundario.
6. Manguera de entrada de longitud 2 m y de diámetro $\frac{3}{4}$ "', conectada a la bomba recirculadora, conduce el fluido al estanque principal (aguas arriba).

7. Válvula AK de PVC 1", conectada al otro extremo de la manguera de entrada y a un medidor de agua con la finalidad de medir el flujo del fluido que se almacene en el estanque principal.
8. Medidor de agua B, mide el volumen de fluido que conduce la manguera de entrada al estanque principal, aguas abajo de él contiene una conexión con un tubo de PVC de 30 cm de longitud y 1" de diámetro, con el fin de disminuir la altura de caída del fluido.

Cabe mencionar, que el sistema de almacenamiento es utilizado estrictamente durante los ensayos que existe abandono de fluido por parte del estanque principal.

El sistema de restitución es activado sólo entre ensayos, es decir, que los componentes 6, 7 y 8 se instalan antes de comenzar un ensayo y luego se extraen.

Notar entonces que la masa del fluido que entra y sale de cualquiera de los dos estanques siempre es conocida.

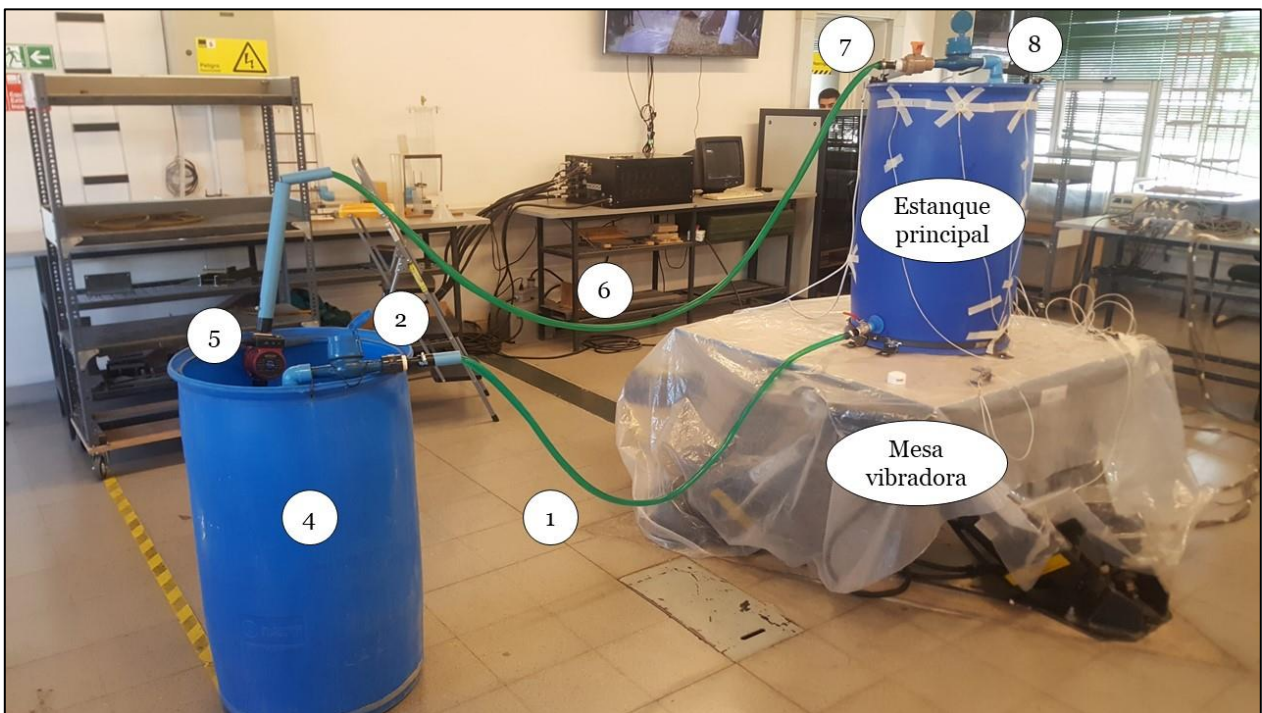


Figura 5.5. Etanque principal y sistema de almacenamiento y restitución.

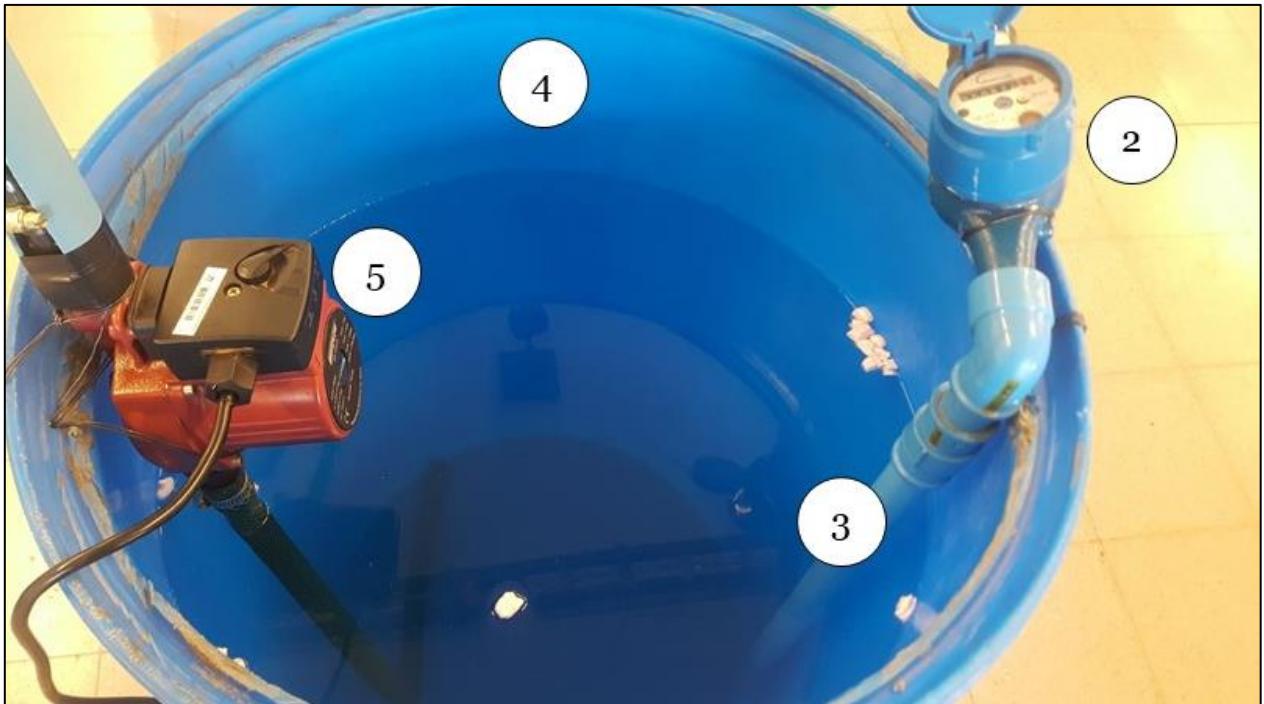


Figura 5.6. Estanque secundario de almacenamiento.

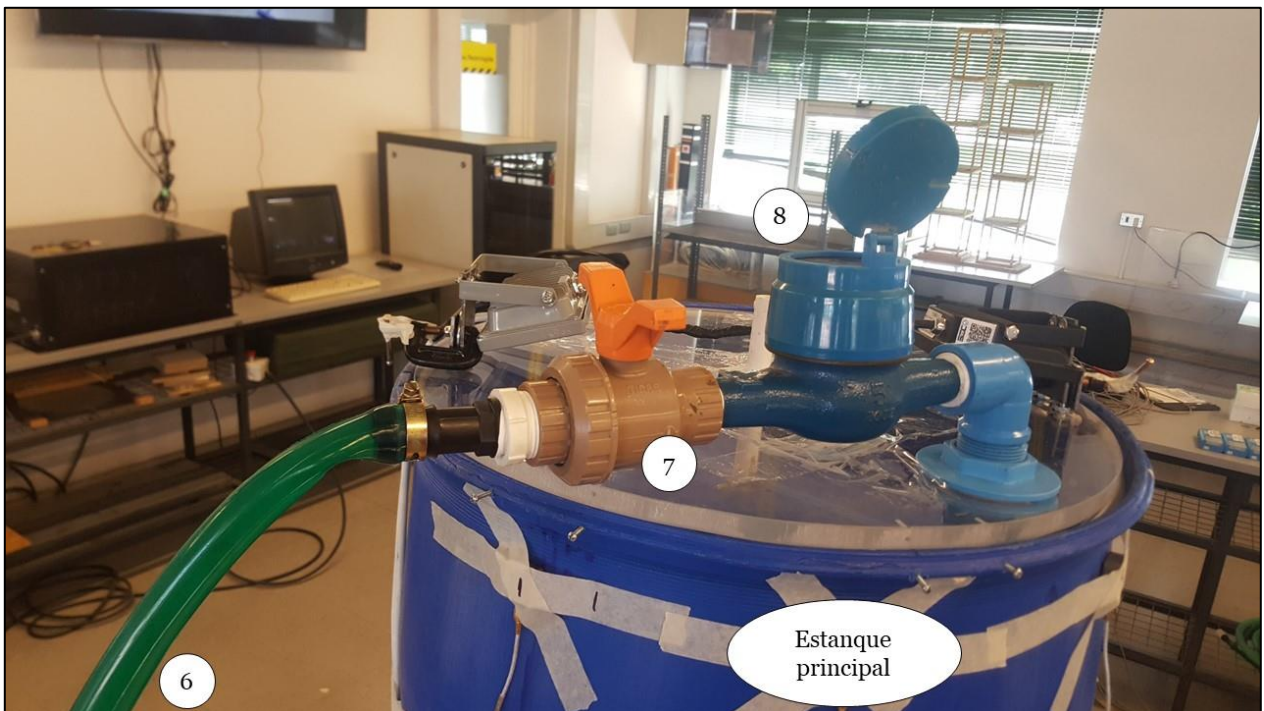


Figura 5.7. Válvula de entrada y medidor de agua B, sistema de restitución.

El estanque principal fue montado sobre la mesa de vibrar MOOG 6DOF200E perteneciente al laboratorio de sólidos de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile. Detalles técnicos de la mesa se visualizan en el Anexo B.

5.2. Montaje en Laboratorio

5.2.1. Elementos de medición

Para obtener la respuesta de la estructura se usan sensores de aceleración o acelerómetros y sensores ultrasónicos para intentar medir el nivel del líquido depositado en el estanque. Mientras que para medir la cantidad de líquido que fluctúa entre sistema principal y secundario, se utilizan medidores de agua.

5.2.1.1. Acelerómetros

Acelerómetros marca KISTLER modelo 8310A K-BEAM uniaxiales, ver Figura 5.8, son los que se utilizan en los ensayos de laboratorio y que su distribución perimetral en el estanque principal se muestra esquemáticamente en las Figura 5.17 y Figura 5.19.

Según el catálogo KISTLER esta serie de acelerómetros, utiliza un elemento de detección de capacitancia variable micro mecanizado de silicio. Es ideal para aplicaciones que requieren la medición de la aceleración de bajo nivel en un entorno estable o de baja frecuencia. Son poco sensibles a los tránsitos térmicos y a la aceleración transversal. Se pueden montar con algún material adhesivo o mediante tornillos. El sensor y los componentes electrónicos están integrados en una sola carcasa de titanio herméticamente sellada y liviana (Kistler Instruments Corporation, n.d.)

Se utilizan 13 acelerómetros KISTLER y en la Tabla 5.3 se muestran las características técnicas de cada uno de ellos.



Figura 5.8. Acelerómetro KISTLER 8310A K-BEAM.

Fuente: (Kistler Instruments Corporation, 2009).

Tabla 5.3. Datos técnicos Acelerómetros KISTLER.

Sensor	Rango de medición (g)	Calibración (mV/g)	Sensibilidad transversal (%)	Frecuencia de resonancia (kHz)
A1	± 2	1003	3	1,4
A2	± 2	993	3	1,4
A3	± 2	986	3	1,4
A4	± 2	995	3	1,4
A5	± 2	994	3	1,4
A6	± 2	984	3	1,4
A7	± 2	987	3	1,4
A8	± 2	989	3	1,4
A9	± 2	987	3	1,4
A10	± 2	984	3	1,4
A11	± 2	997	3	1,4
A12	± 2	986	3	1,4
A13	± 2	969	3	1,4

5.2.1.2. Sensores Ultrasónicos

Sensores ultrasónicos marca BANNER modelo U-GAGE S18UUAQ, ver Figura 5.9, junto con los acelerómetros KISTLER completan la totalidad de sensores que se utilizan en los ensayos de laboratorio.

Según el catálogo BANNER los sensores ultrasónicos emiten uno o varios pulsos de energía ultrasónica, que viajan por el aire a la velocidad del sonido. Una parte de la energía se refleja en el objeto y regresa al sensor. Este mide el tiempo total requerido para que la energía alcance al objetivo y regrese al sensor. Para mejorar la precisión, un sensor ultrasónico puede promediar los resultados de varios pulsos antes de emitir un nuevo valor. La velocidad del sonido depende de la composición, la presión atmosférica y la temperatura del aire (y/o el gas en cual se propaga) (Banner, 2013).



Figura 5.9. Sensor Ultrasónico S18UUAQ BANNER ENGINEERING.
Fuente: (Hans Turck GmbH & Co.KG, 2018).

Se utilizan 3 sensores ultrasónicos BANNER ENGINEERING y en la Tabla 5.4 muestran los detalles técnicos de los sensores utilizados:

Tabla 5.4. Datos técnicos Ultrasónicos BANNER ENGINEERING.

Modo de funcionamiento	Sensor ultrasónico modo difuso
Alcance	30 cm
Frecuencia de ultrasónico	300 kHz
Precisión de repetición	$\leq \pm 0,25$ mm
Longitud del canto del elemento de mando nominal	50 mm
Tensión de servicio	10-30 VCC
Corriente sin carga	≤ 100 mA
Tiempo de respuesta típica	3 ms
Salida de voltaje	0-10 V

Fuente: (Hans Turck GmbH & Co.KG, 2018).

5.2.1.3. Medidor de agua potable domiciliario

Se utilizan 2 medidores de agua marca INVENSYS, ver Figura 5.10, para los ensayos en laboratorio con la finalidad de obtener la masa de agua que transita entre los estanques principal y secundario. En la Tabla 5.5, se muestran las especificaciones técnicas de los medidores.

Tabla 5.5. Especificaciones técnicas medidor de agua DN 19 mm (3/4").

Diámetro nominal	pulgadas	¾"
	mm	19
Caudal máximo, $Q_{m\acute{a}x}$	l/min	83,33
Caudal nominal, Q_n	l/min	41,67
Máxima capacidad de lectura	m ³	99,999
Mínima capacidad de lectura	l	0,05
Presión de servicio	Bar	16
Pérdida de carga en $Q_{m\acute{a}x}$	Bar	0,8
Pérdida de carga en Q_n	Bar	0,19
Temperatura máxima del agua	°C	40
Error relativo máximo	Campo superior de medición	± 2%
	Campo inferior de medición	± 5%

Fuente: (Invensys, n.d.).



Figura 5.10. Medidor de agua potable domiciliario INVENSYS.

Fuente: (Invensys, n.d.).

5.2.2. Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) corresponde al proceso de digitalizar y registrar en un computador una medición de uno o varios sensores que describen una señal analógica descrita por una señal eléctrica o física como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ se compone de sensores, hardware de medidas DAQ y un computador con software programable, esquemáticamente se muestra en la Figura 5.11.



Figura 5.11. Esquema del Sistema de Adquisición de datos (DAQ).

Fuente: (National Instruments, 2019).

En la Figura 5.12 y Figura 5.13 se muestra el sistema de adquisición de datos utilizado en los ensayos experimentales, el cual consiste en un tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI-PCI 6014 que no contiene filtro, tiene una fuente de poder MCP M10-380S-303E con 12 V de voltaje de excitación y un computador con el software de adquisición LabVIEW, configurado para registrar datos a una tasa de muestreo de 1000 Hz para todos los ensayos efectuados.

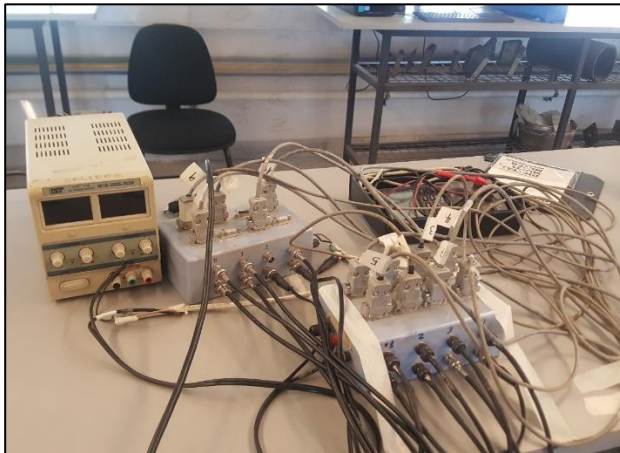


Figura 5.12. Dispositivos de adquisición de datos.



Figura 5.13. Computador Sistema en cual se encuentra la tarjeta de adquisición de datos.

El hardware de un DAQ funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que el computador pueda interpretarlas y registrarlas. Los dos componentes claves del sistema DAQ usado para medir las señales son el convertidor analógico-digital (ADC) y el software de control. El computador con el

software programable controla la operación del dispositivo DAQ y es usado para procesar, visualizar y almacenar datos de medida (National Instruments, 2019).

5.2.2.1. Convertidor analógico digital (ADC)

Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el computador. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. Las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y el ADC realiza “muestras” periódicas de la señal a una frecuencia de muestreo predefinida.

El ADC utilizado tiene una resolución de 16 bits y se configura para que realice muestras a 1000 Hz. Estas muestras son transferidas al computador a través del bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en el software.

5.2.3. Cámaras de video

Las cámaras de video utilizadas para observar el movimiento del líquido al interior del estanque principal están detalladas en la Tabla 5.6 junto con sus posiciones angulares, con respecto al eje X de la mesa vibradora, y sus principales especificaciones técnicas necesarias para garantizar adecuados registros visuales. En la Figura 5.3 es posible visualizar el montaje de las cámaras de video.

Tabla 5.6. Características cámaras de video

Cámara	Identificador	Posición	Resolución	Distancia focal
GoPro Hero 3+	GP1	30°	1080p a 30fps	17 – 28 mm (Gran angular)
GoPro Hero 4 Silver	GP2	150°	1080p a 60fps	17 – 28 mm (Gran angular)
GoPro Hero 4	GP3	270°	1080p a 60fps	17 – 28 mm (Gran angular)

En la Figura 5.14 se muestra un esquema representativo de las cámaras de video GoPro colocadas en el soporte metálico que está instalado en la tapa de acrílico.

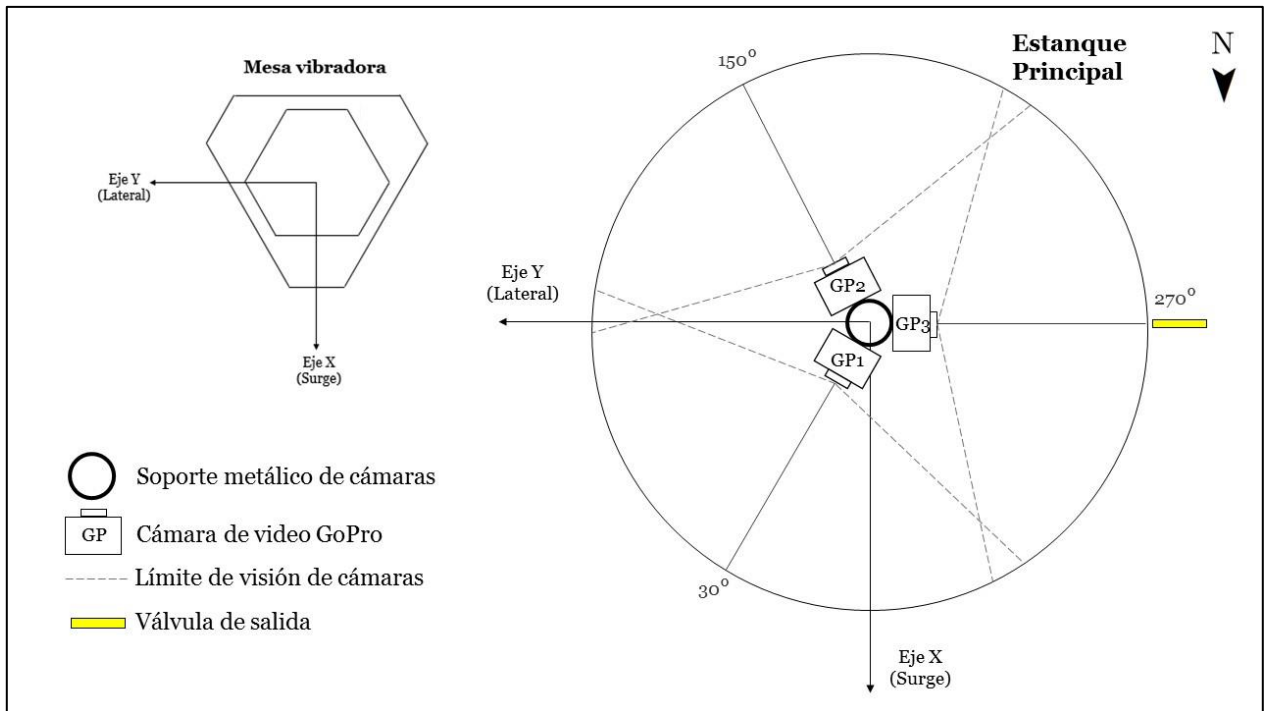


Figura 5.14. Posiciones cámaras de video GoPro.

5.2.4. Equipo secundario

Se considera equipo secundario a la bomba recirculadora instalada en el sistema de restitución. Aquella se muestra en la Figura 5.15 y sus especificaciones técnicas en la Tabla 5.7, con lo cual es posible estimar el tiempo necesario para la restitución del fluido en el estanque principal.



Figura 5.15. Bomba recirculadora Grundfos. Fuente: (Sodimac S.A., 2018).

Tabla 5.7. Especificaciones técnicas Bomba recirculadora

Atributo	Detalle
Marca	Grundfos
Modelo	UPA 15-90
Caudal máximo	30 l/min
Voltaje	220 V
Flujo de salida	20 l/min
Material	Hierro fundido
Altura máxima	8 m
Alimentación	Red eléctrica
Potencia	0,17 HP
Conexión	½"
Presión máxima	6 bar

Fuente: (Sodimac S.A., 2018).

5.2.5. Disposición de sensores

Se realiza el montaje del sistema con dos configuraciones distintas de distribución de acelerómetros montados en el manto exterior y en dirección radial del estanque principal, configuración de distribución A y B, respectivamente. Ambas distribuciones tienen en común la posición de los acelerómetros A12 y A11, los cuales están orientados en la dirección de los ejes X e Y, respectivamente. Estos sensores fueron atornillados a un cubo de acrílico, el cual está anclado a la placa base de madera de la mesa vibradora, ver Figura 5.16.

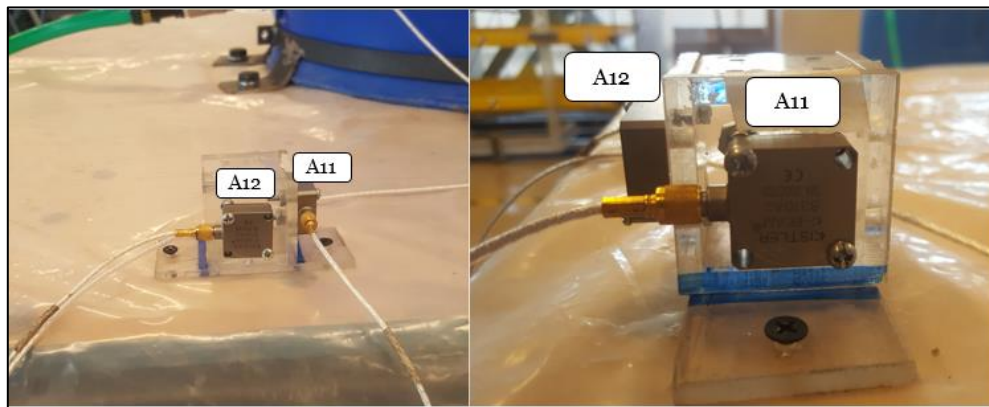


Figura 5.16. Acelerómetros instalados en placa base de madera.

5.2.5.1. Configuración A de sensores

Se utilizan 10 acelerómetros y 3 sensores ultrasónicos distribuidos en el manto del estanque principal en direcciones radiales según detalla la Tabla 5.8. Esquemáticamente se muestra una vista en planta y dos vistas en elevación a distintos ángulos en las Figura 5.17 y Figura 5.18, respectivamente. Los acelerómetros se representan con la letra “A” y los ultrasónicos con la letra “U”. La referencia de altura de los acelerómetros se detalla respecto a la superficie de la placa base de madera. Además, cabe destacar que la orientación original del estanque y la mesa vibradora obedecen a la dirección de los ejes mostrados en la Figura 9.8.

Tabla 5.8. Configuración A de sensores en estanque principal.

Sensor	Ángulo (°)	Altura (cm)	Radio (cm)
A1	270	85	29
A2	90	85	29
A3	90	7	29
A4	180	85	29
A5	180	45	29
A6	180	7	29
A7	135	85	29
A8	45	85	29
A9	90	45	29
A10	330	80	29
U1	90	90	15
U2	180	90	15
U3	300	90	15

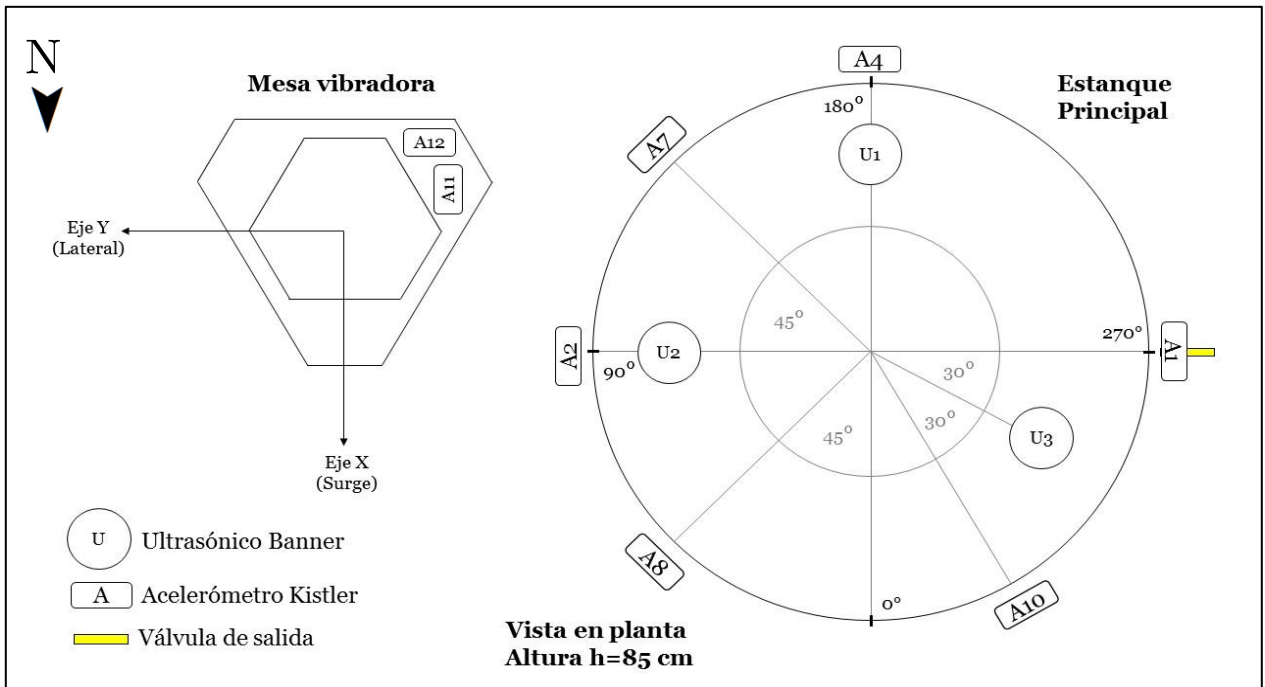


Figura 5.17. Configuración A de sensores, vista en planta h=85 cm.

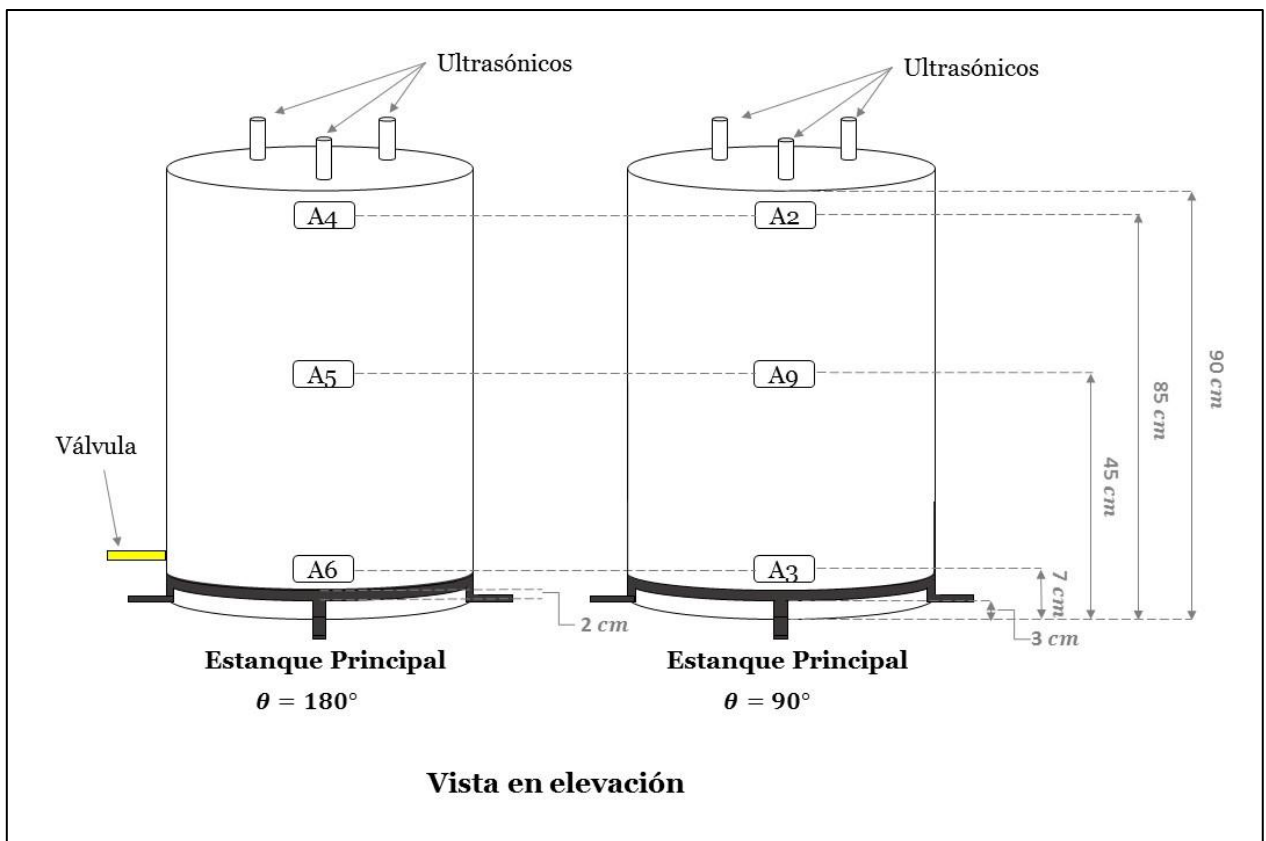


Figura 5.18. Configuración A de sensores, vista en elevación.

5.2.5.2. Configuración B de sensores

Para la segunda configuración, se utilizan 11 acelerómetros distribuidos en el manto del estanque principal en dirección radial según lo establecido en la Tabla 5.9. Análogo al caso anterior, se muestra en la Figura 5.19 un esquema representativo de la distribución de sensores con las mismas consideraciones, salvo que, para este caso, los acelerómetros están dispuestos a la misma altura desde la base y no se utilizan ultrasónicos.

Tabla 5.9. Configuración B de sensores en estanque principal

Acelerómetro	Ángulo (°)	Altura (cm)
A1	270	45
A2	241	45
A3	210	45
A4	180	45
A5	150	45
A6	120	45
A7	90	45
A8	61	45
A9	30	45
A10	0	45
A13	315	45

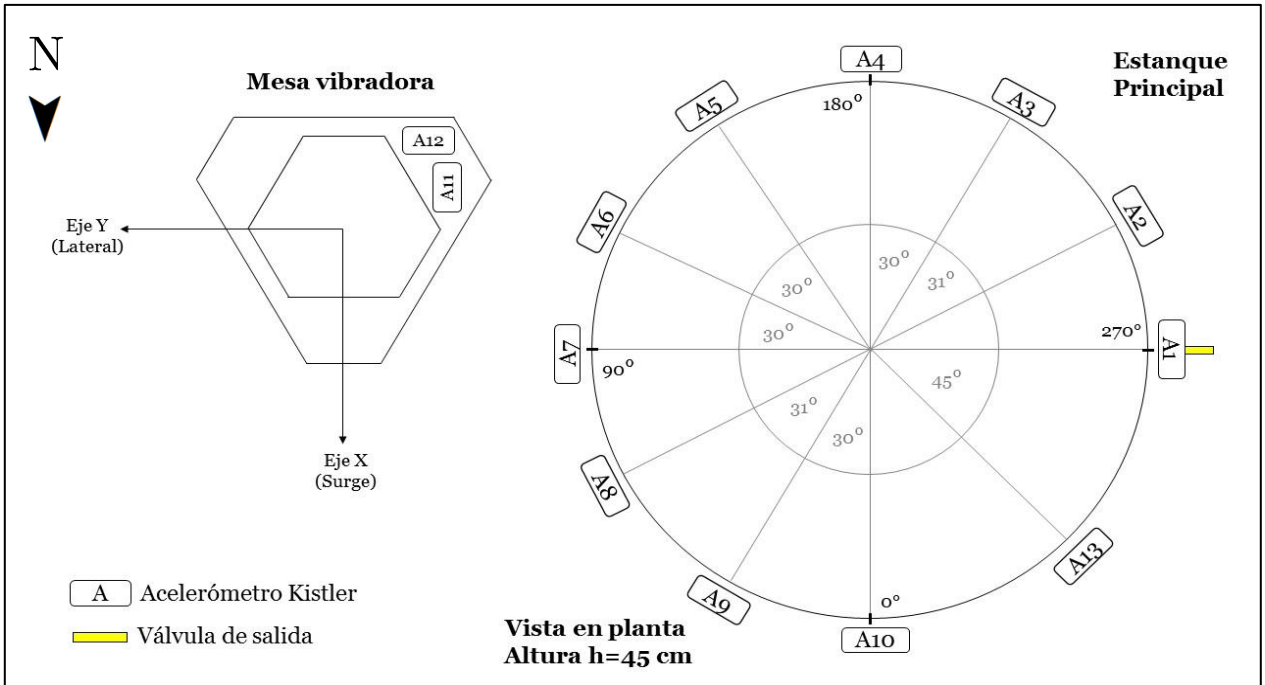


Figura 5.19. Configuración B de sensores, vista en planta h=45 cm.

5.3. Generación de registros de señales aleatorias

Utilizando el programa computacional Matlab se generan dos tipos de registros de señales de aceleraciones aleatorias, caracterizadas como registros aleatorios Gaussianos independientes denominados como suaves y fuertes, con duración de 10 minutos, tiempo mínimo necesario para generar ensayos en cual se pueda vaciar completamente el estanque principal. Cada uno tiene un lapso de 15 segundos de aceleración nula al inicio y al final, con el fin de que el ensayo de la estructura comience y termine en reposo.

Se generan archivos binarios a una tasa de muestreo de 60 Hz que son posteriormente leídos en el sistema de control de la mesa vibradora permitiendo de esta forma generar una entrada al sistema, teniendo en cuenta que los registros ingresados no pueden superar los límites admisibles de desplazamiento, velocidad y aceleración que puede generar la mesa vibradora MOOG (Anexo B).

5.3.1. Registro aleatorio suave

5.3.1.1. Teórico

Se caracteriza como “suaves” a los registros de aceleraciones aleatorias generados con un RMS de **0,04g** en los ejes X e Y según referencia de mesa vibradora, ver Figura 5.20. Estos contienen un filtro pasa bajo de 25 Hz, ver Figura 5.21. Dado el alcance de lo que se desea estudiar, no es necesario generar aceleraciones en el eje Z (movimiento “Heave” de la mesa según Figura 9.7).

En la Tabla 5.10 se muestran datos relevantes sobre los movimientos de los registros aleatorios suaves, notar que no se superan los valores límites que puede reproducir la mesa mostrados en la Tabla 9.3.

En las Figura 5.22 y Figura 5.23, se muestra la gráfica de los registros de aceleraciones teóricos (i.e., ingresados al sistema previo al procesamiento, leídos por la mesa vibradora), junto con la velocidad y desplazamiento teóricos para los ejes X e Y, respectivamente.

Tabla 5.10. Datos registro de aceleraciones aleatorias suaves.

Parámetro	Eje X	Eje Y
RMS (g)	0,04	0,04
Aceleración máxima (g)	0,16	0,15
Velocidad máxima (cm/s)	8,82	10,34
Desplazamiento máximo (cm)	3,76	3,36
Tasa de muestreo (Hz)	60	60

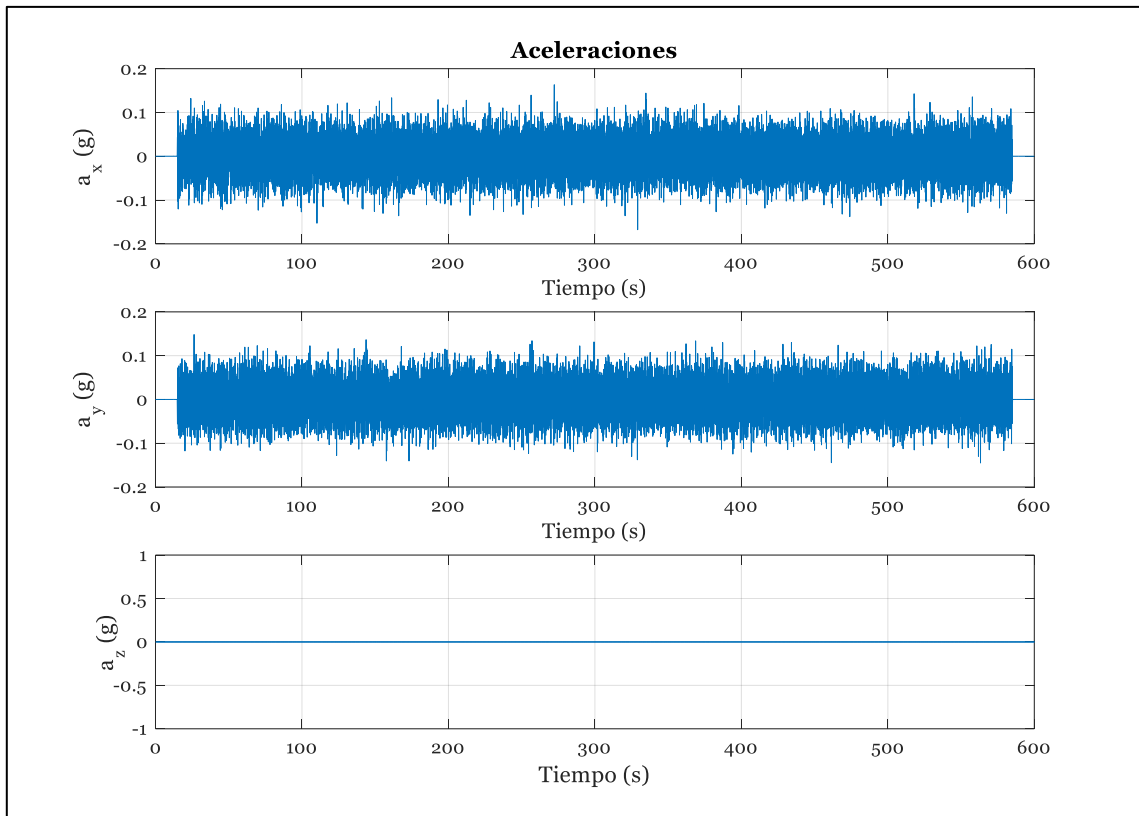


Figura 5.20. Registro de aceleraciones aleatorias suaves para cada eje.

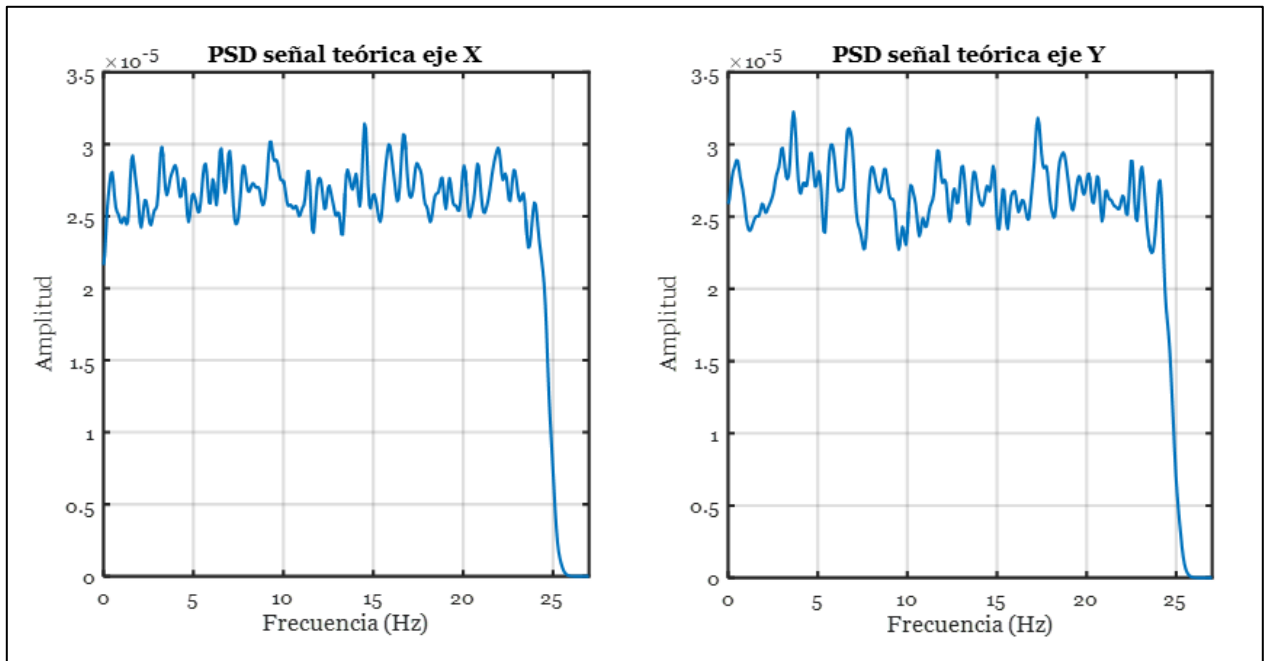


Figura 5.21. Espectro de potencia del registro aleatorio suave para los ejes X e Y.

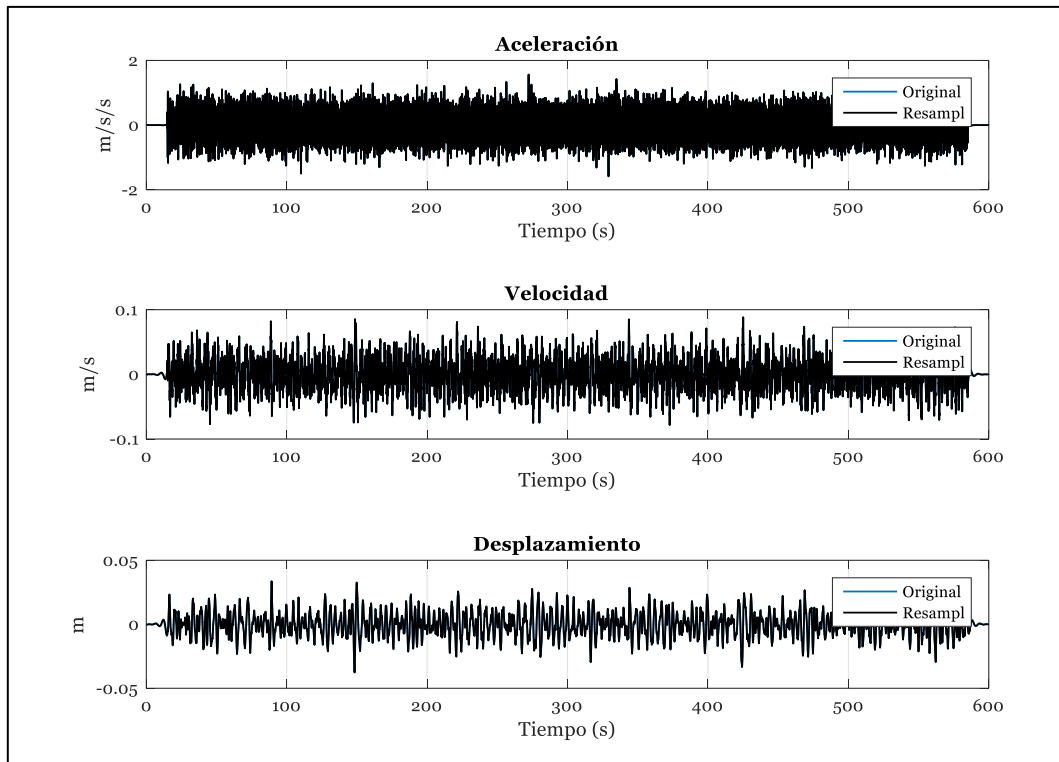


Figura 5.22. Registro de aceleraciones aleatorias suaves, velocidad y desplazamiento en eje X.

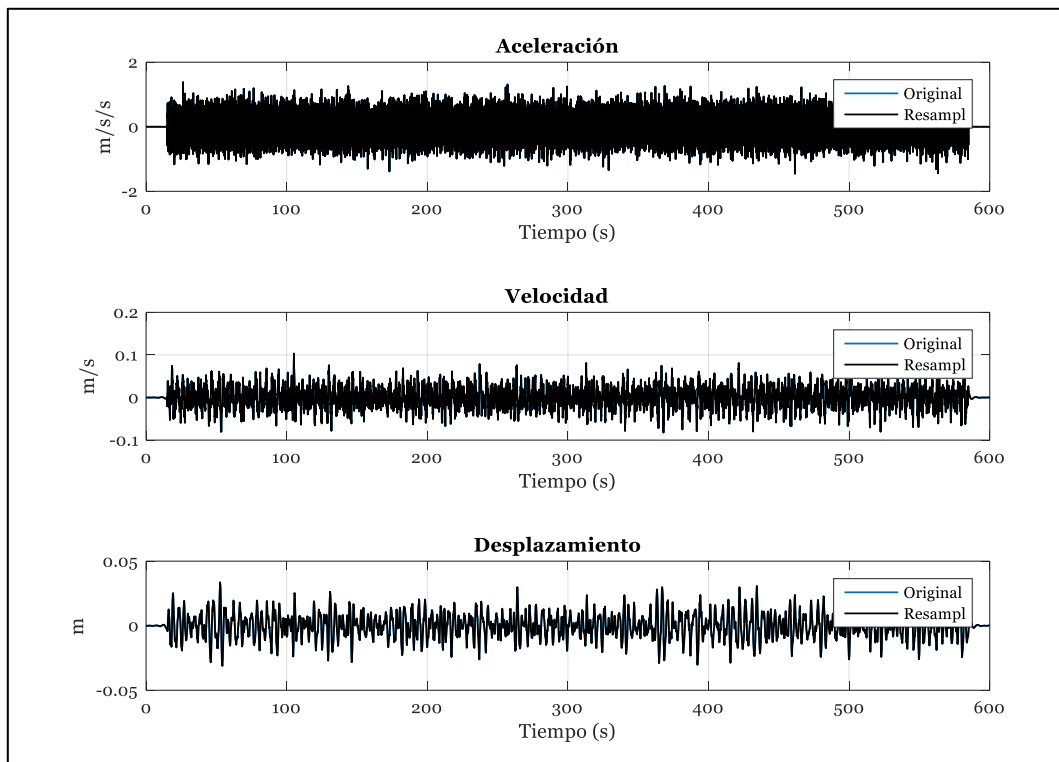


Figura 5.23. Registro de aceleraciones aleatorias suaves, velocidad y desplazamiento en eje Y.

5.3.1.2. Experimental

Las mediciones experimentales de las aceleraciones basales que generó la mesa vibradora, tras ingresar los registros aleatorios teóricos caracterizados como suaves, se muestran en la Figura 5.24.

En la Tabla 5.11 se muestran parámetros relevantes del registro de aceleraciones experimentales caracterizadas como suaves.

Las Figura 5.25. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A12 y A6, respectivamente, registro a01vacio000. Figura 5.25 y Figura 5.26 muestran el espectro de potencia de la señal de aceleraciones basales teóricas y experimentales en el eje X e Y, respectivamente, para un contenido de frecuencia de 0 a 25 Hz. De los cuales es posible notar que la mesa vibradora reproduce mejor las bajas frecuencias. Todo lo anterior para una configuración A de sensores.

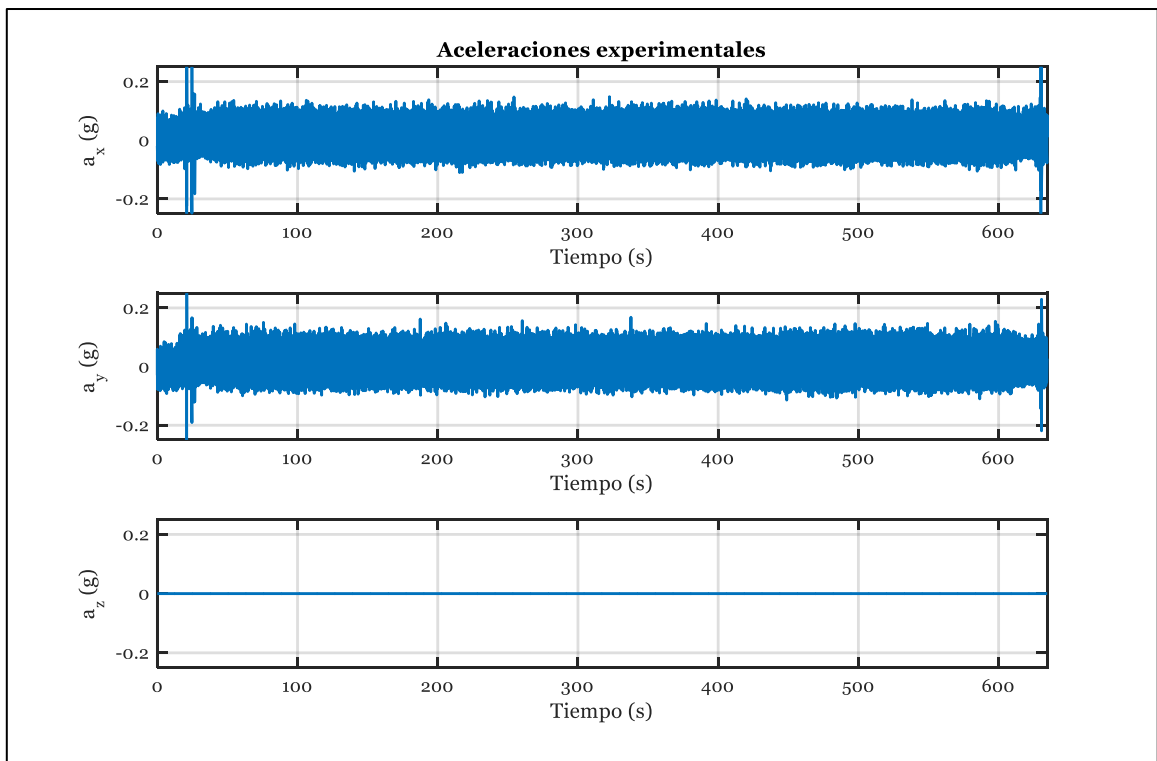


Figura 5.24. Aceleraciones basales medidas experimentalmente en X e Y, acelerómetros A12 y A11, respectivamente, registro a01vacio000.

Tabla 5.11. Parámetros de aceleraciones experimentales basales, registro a01vacio000.

Parámetro	Eje X	Eje Y
RMS (g)	0,030	0,032
Aceleración máxima (g)	0,738	0,353
Tasa de muestreo (Hz)	1000	1000

Comparando los resultados de la Tabla 5.10 y Tabla 5.11 es posible apreciar que el RMS de las aceleraciones que reproduce la mesa corresponden a un 75% del RMS que se introdujo teóricamente, para el movimiento caracterizado como suave.

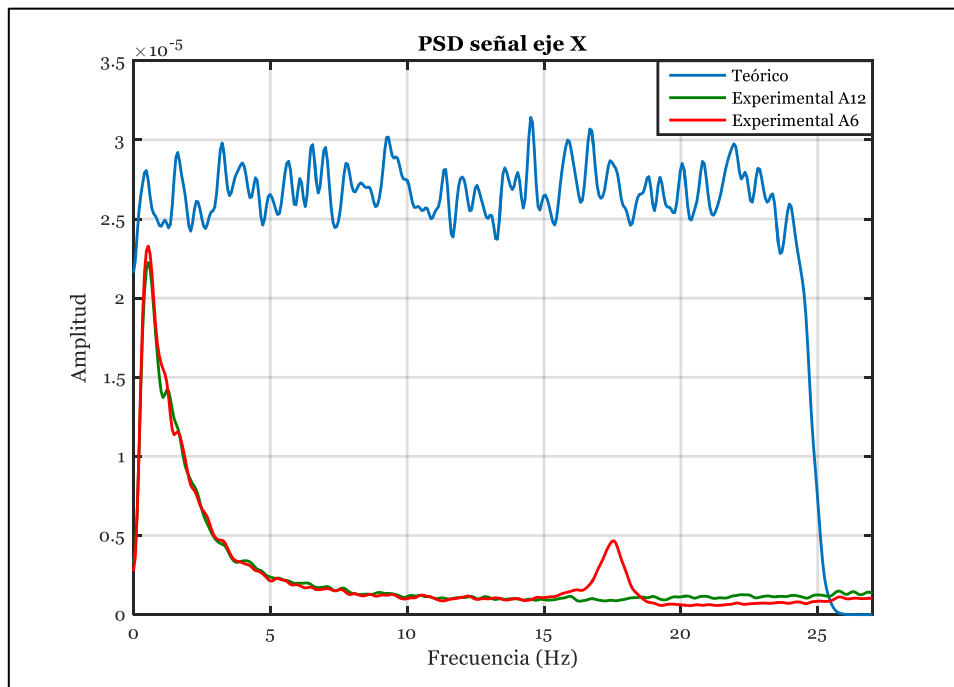


Figura 5.25. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A12 y A6, respectivamente, registro a01vacio000.

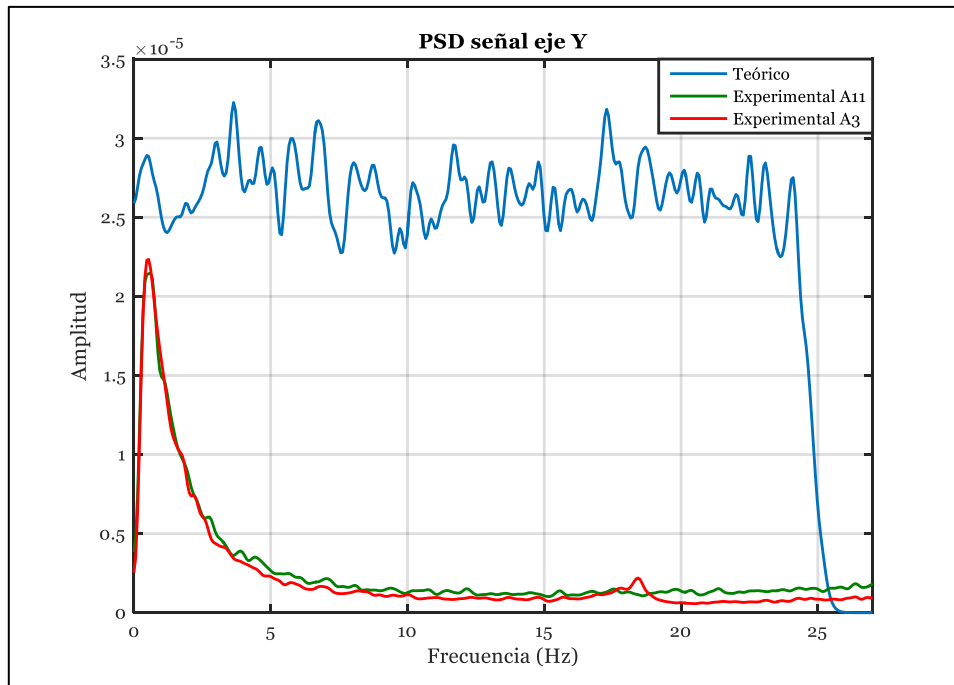


Figura 5.26. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje Y, acelerómetros A11 y A3, respectivamente, registro a01vacio000.

En las Figura 5.27 y Figura 5.28 se muestra la función de transferencia de la mesa vibradora, la cual se obtiene al comparar las señales teóricas y experimentales del acelerómetro A12 (dirección eje X) y del acelerómetro A11 (dirección eje Y), respectivamente. Se debe señalar fue necesario sincronizar manualmente los datos teóricos y experimentales, por tanto estos resultados son sólo referenciales.

Adicionalmente, en las Figura 5.29 y Figura 5.30 se muestran las funciones de transferencia entre los sensores a nivel basal (A6 y A3) con los que están a una mayor altura instalados en el estanque (A4 y A2), para el eje X e Y, respectivamente. Se observa que en bajas frecuencias (1 Hz a 3 Hz) los gráficos no presentan variación con la presencia de agua en su interior.

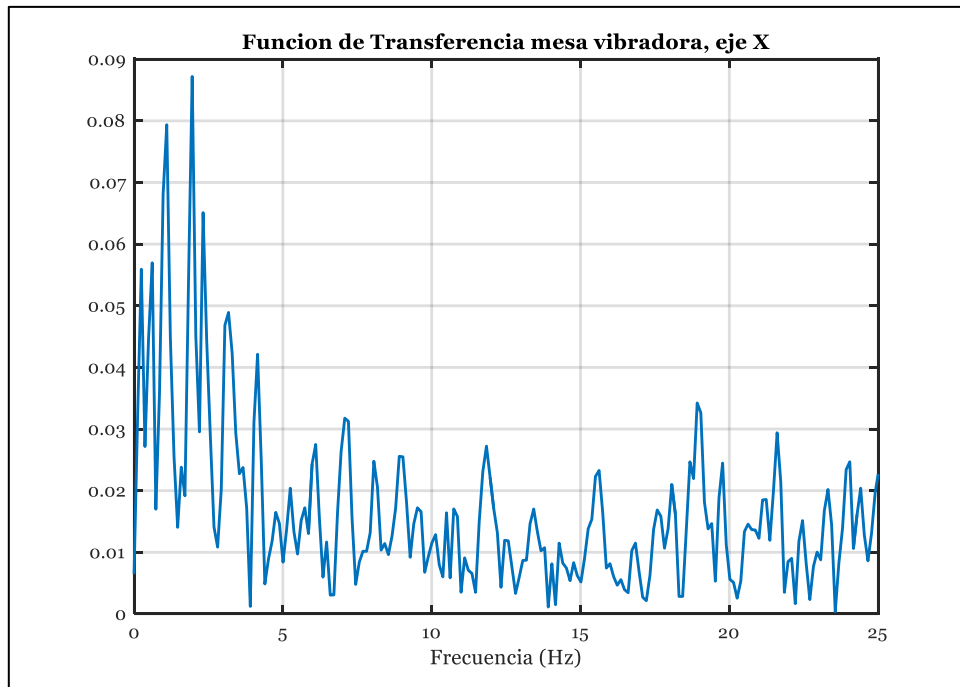


Figura 5.27. Valor absoluto de función de transferencia (eje X), señal teórica vs acelerómetro A12, registro a01vacio000.

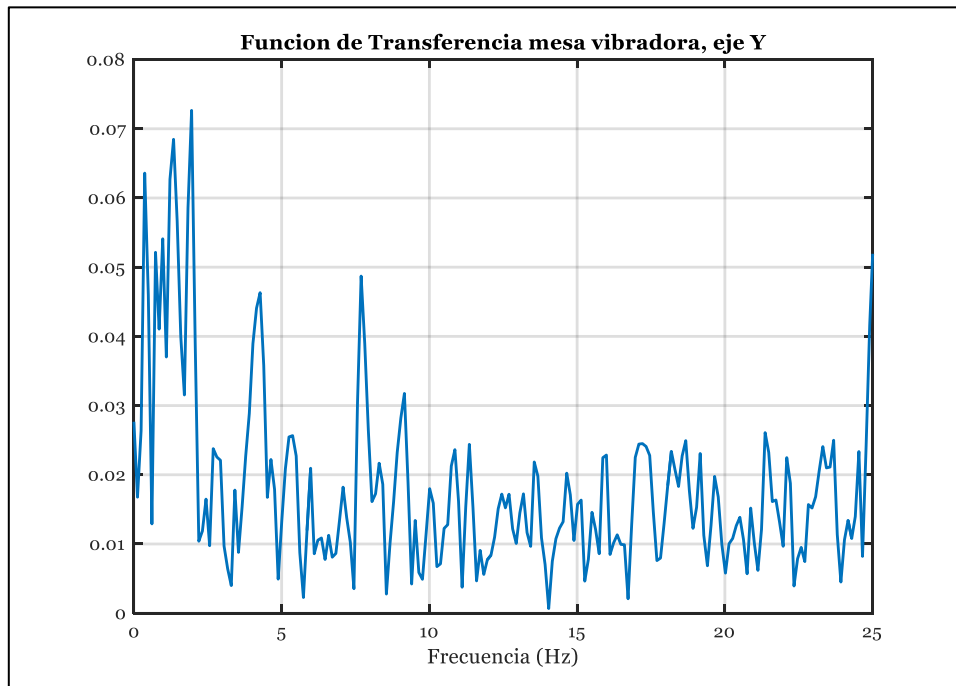


Figura 5.28. Valor absoluto de función de transferencia (eje Y), señal teórica vs acelerómetro A11, registro a01vacio000.

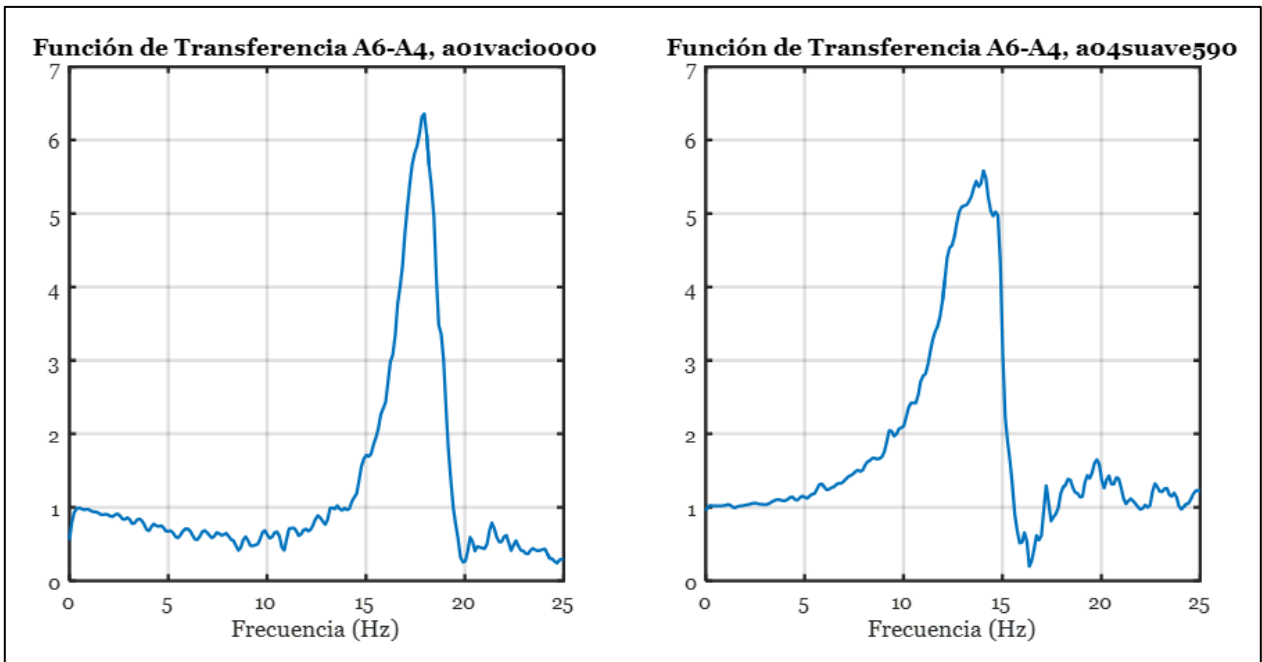


Figura 5.29. Función de transferencia entre sensores A6-A4 (eje X), para estanque vacío y con altura de agua constante en su interior, registros a01vacio000 y a04suave590, respectivamente, aceleraciones basales AS692.

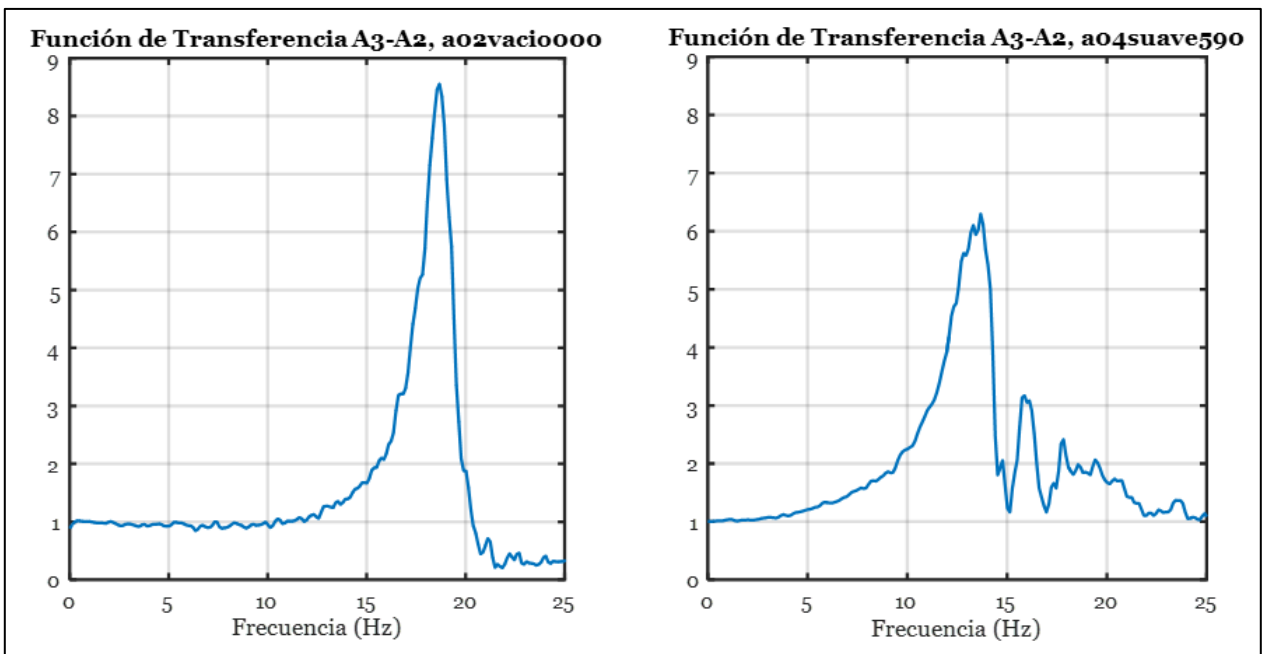


Figura 5.30. Función de transferencia entre sensores A3-A2 (eje Y), para estanque vacío y con altura de agua constante en su interior, registros a01vacio000 y a04suave590, respectivamente, aceleraciones basales AS692.

5.3.2. Registro aleatorio fuerte

5.3.2.1. Teórico

Se caracteriza como “fuertes” a los registros de aceleraciones aleatorias con un RMS de $0,09g$ en los ejes X e Y según referencia de la mesa vibradora, ver Figura 5.31. Análogo al caso anterior, este registro contiene un filtro pasa bajo de 25 Hz, ver Figura 5.32, y no se generan aceleraciones en el eje Z.

En la Tabla 5.12 se muestran datos relevantes de los registros aleatorios fuertes. No se sobrepasan los valores límites reproducibles por la mesa mostrados en la Tabla 9.3.

En las Figura 5.33 y Figura 5.34, se muestran los registros de aceleraciones (que son leídos por la mesa vibradora), junto con la velocidad y desplazamiento teóricos de la mesa para los ejes X e Y, respectivamente.

Tabla 5.12. Datos registro de aceleraciones aleatorias fuertes.

Parámetro	Eje X	Eje Y
RMS (g)	0,09	0,09
Aceleración máxima (g)	0,36	0,39
Velocidad máxima (cm/s)	21,80	25,26
Desplazamiento máximo (cm)	8,50	10,19
Tasa de muestreo (Hz)	60	60

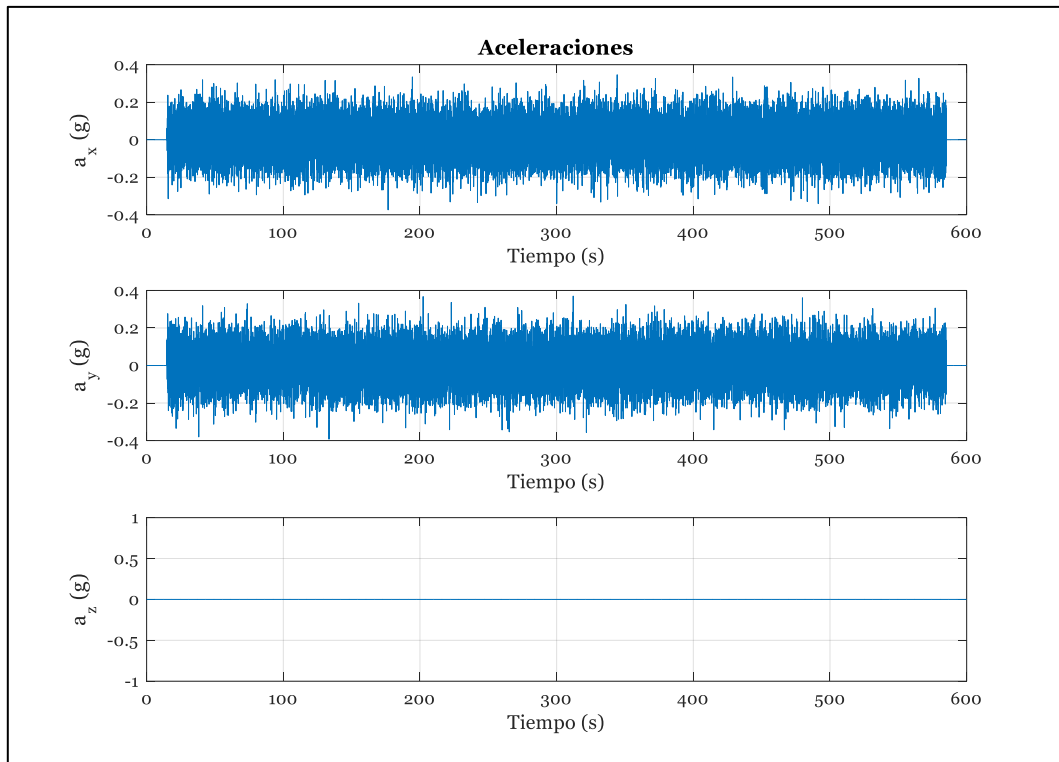


Figura 5.31. Registro de aceleraciones aleatorias fuertes para cada eje.

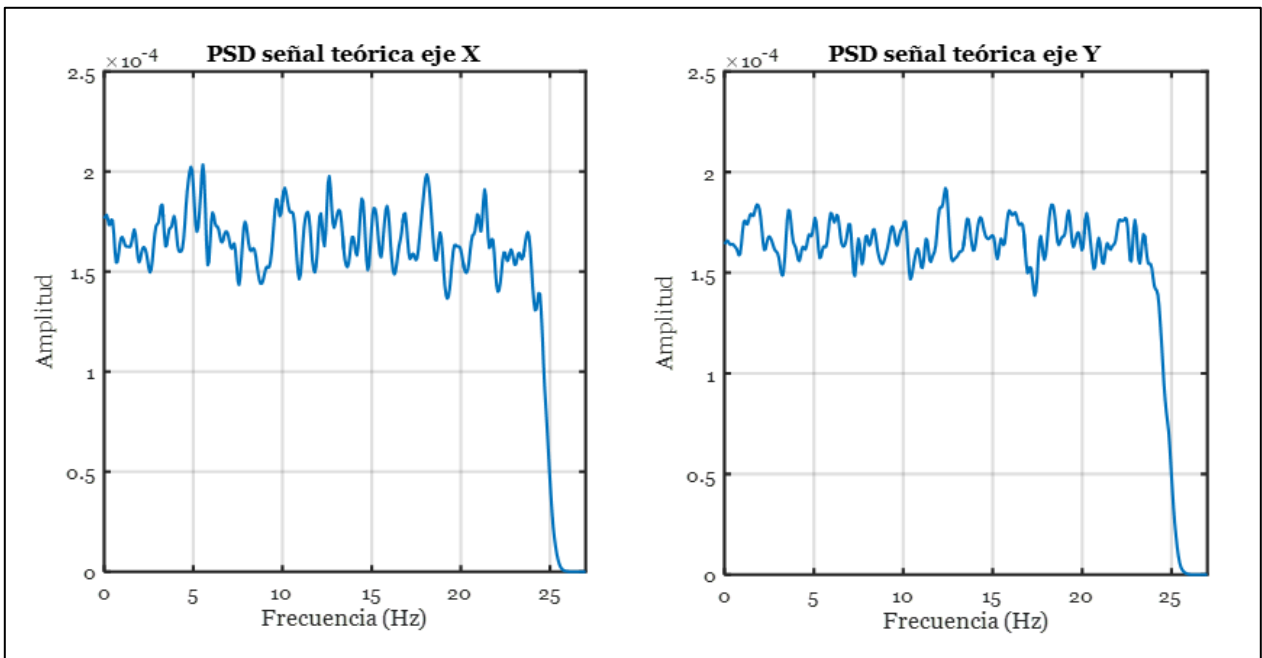


Figura 5.32. Espectro de potencia del registro aleatorio fuerte para los ejes X e Y.

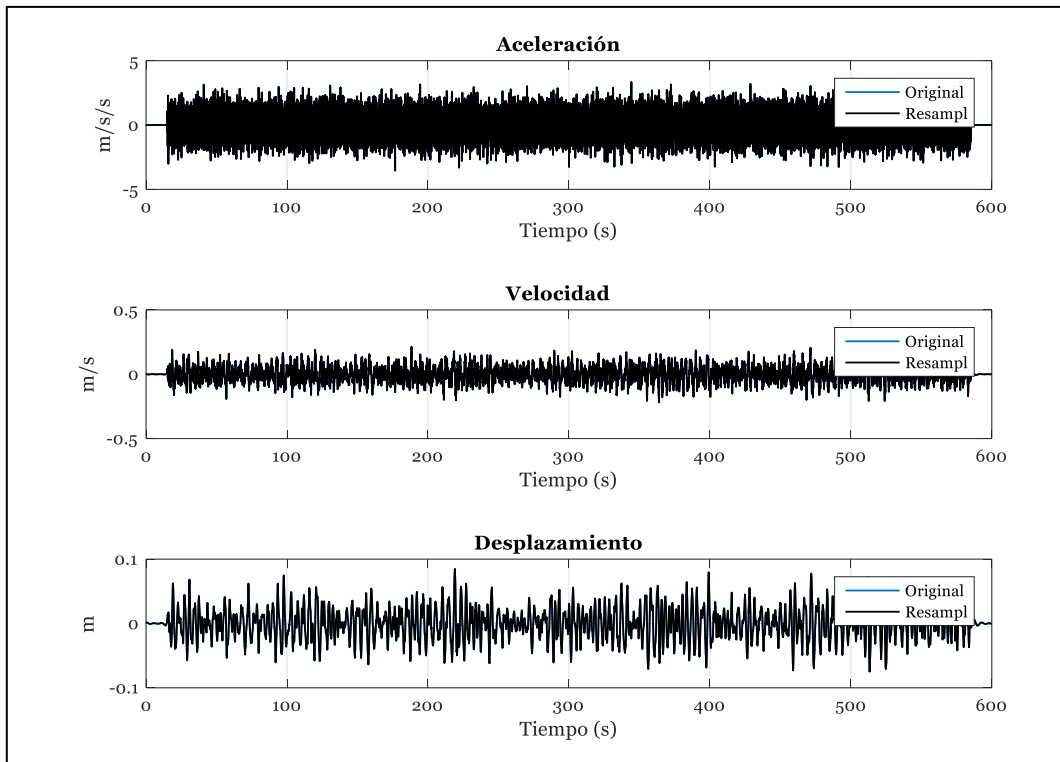


Figura 5.33. Registro de aceleraciones aleatorias fuertes, velocidad y desplazamiento en eje X.

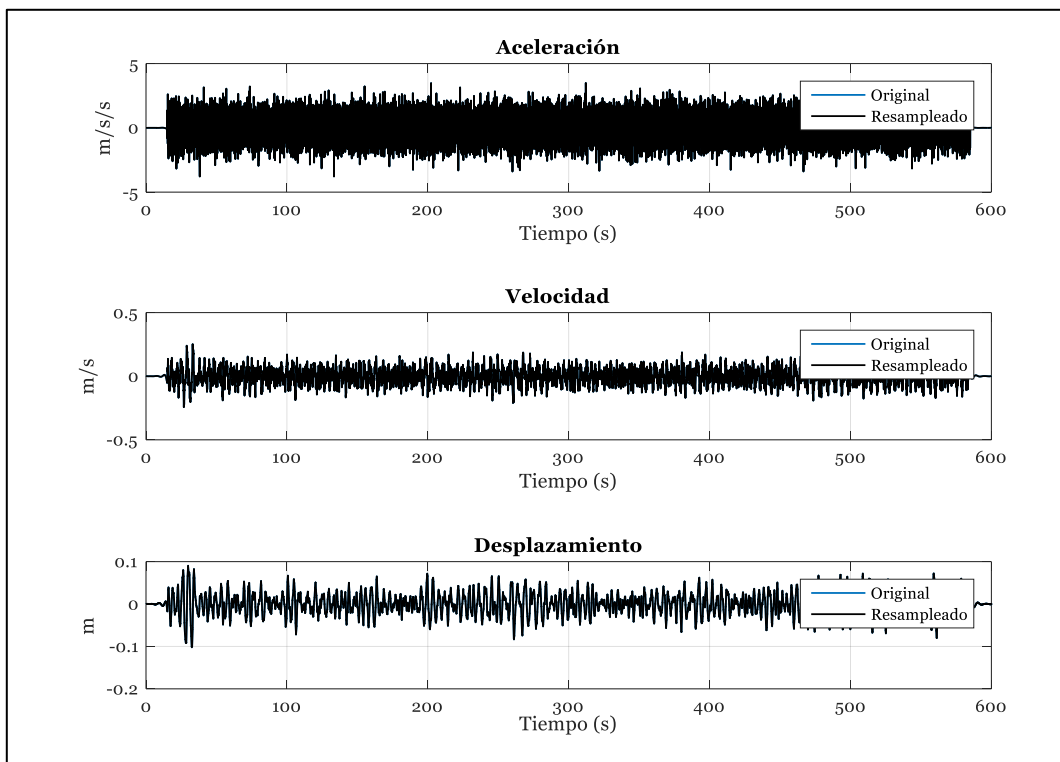


Figura 5.34. Registro de aceleraciones aleatorias fuertes, velocidad y desplazamiento en eje Y.

5.3.2.2. Experimental

Las mediciones experimentales de las aceleraciones basales que generó la mesa vibradora, tras ingresar los registros aleatorios teóricos caracterizados como fuertes, se muestran en la Figura 5.35.

En la Tabla 5.13 se muestran parámetros relevantes del registro de aceleraciones experimentales caracterizadas como fuertes.

Las Figura 5.25. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A12 y A6, respectivamente, registro a01vacio000. Figura 5.36 y Figura 5.37 muestran el espectro de potencia de la señal de aceleraciones basales teóricas y experimentales en el eje X e Y, respectivamente, para un contenido de frecuencia de 0 a 25 Hz. Análogo al caso anterior, se muestra que la mesa reproduce de mejor forma los movimientos con baja frecuencia y el análisis se realiza para la config. A.

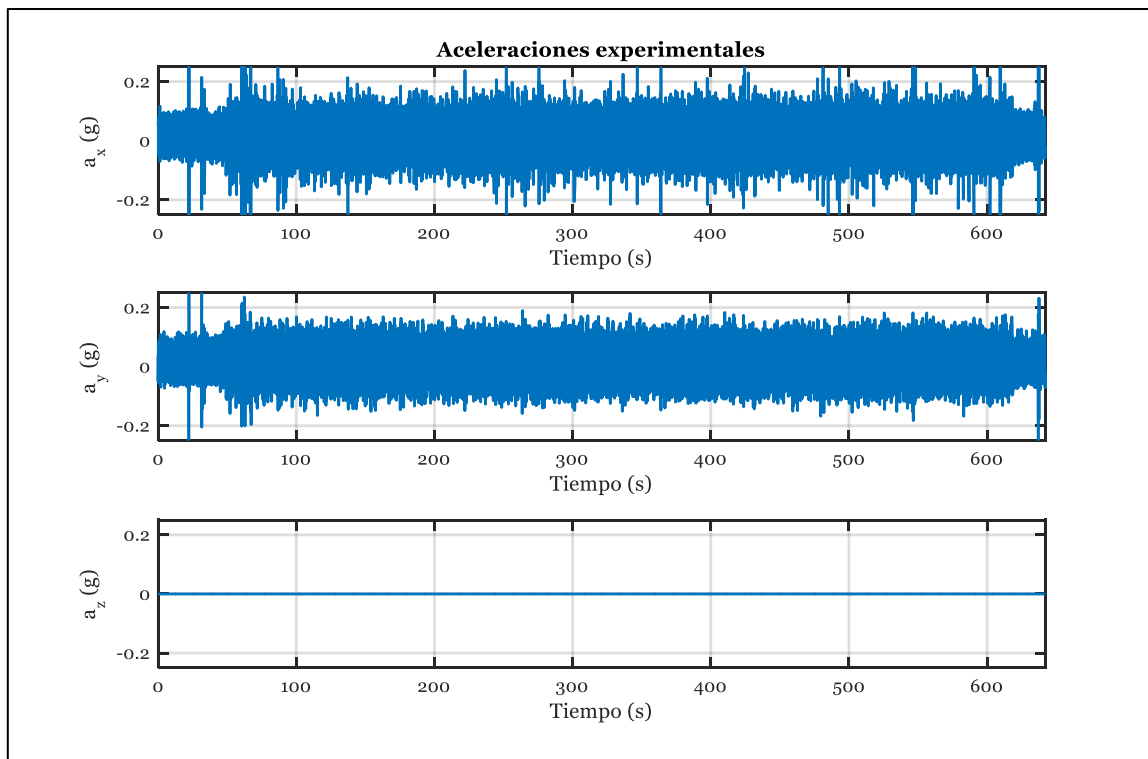


Figura 5.35. Aceleraciones basales medidas experimentalmente en X e Y, acelerómetros A12 y A11, respectivamente, registro a02vacio000.

Tabla 5.13. Parámetros de aceleraciones experimentales basales, registro a02vacio000.

Parámetro	Eje X	Eje Y
RMS (g)	0,041	0,039
Aceleración máxima (g)	0,681	0,385
Tasa de muestreo (Hz)	1000	1000

Comparando los resultados de la Tabla 5.12 y Tabla 5.13 es posible apreciar que el RMS de las aceleraciones que reproduce la mesa corresponden a un 44,4% del RMS que se introdujo teóricamente, para el movimiento caracterizado como fuerte.

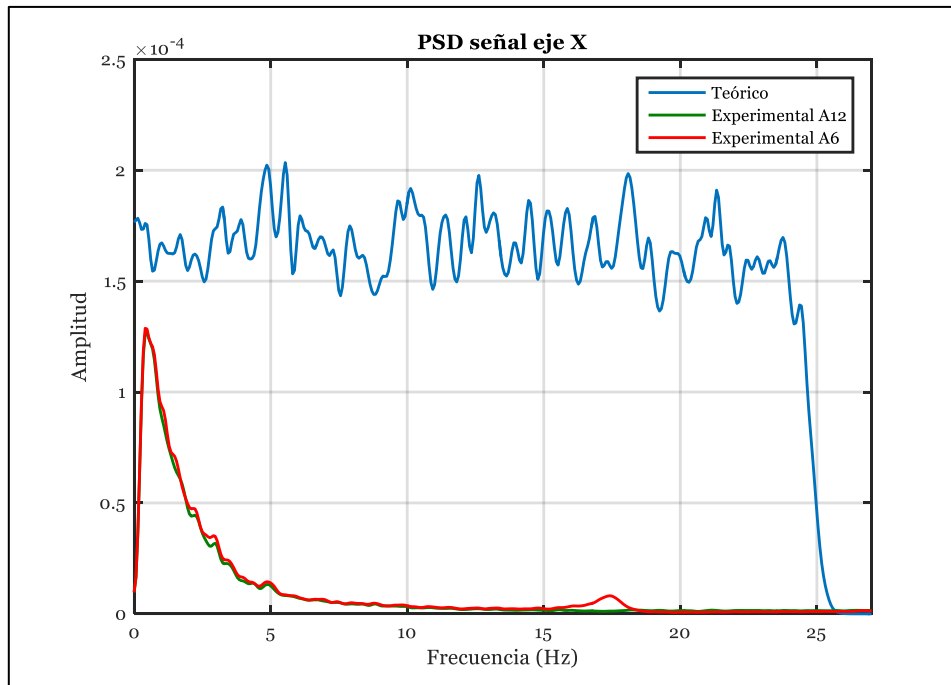


Figura 5.36. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A12 y A6, respectivamente, registro a02vacio000.

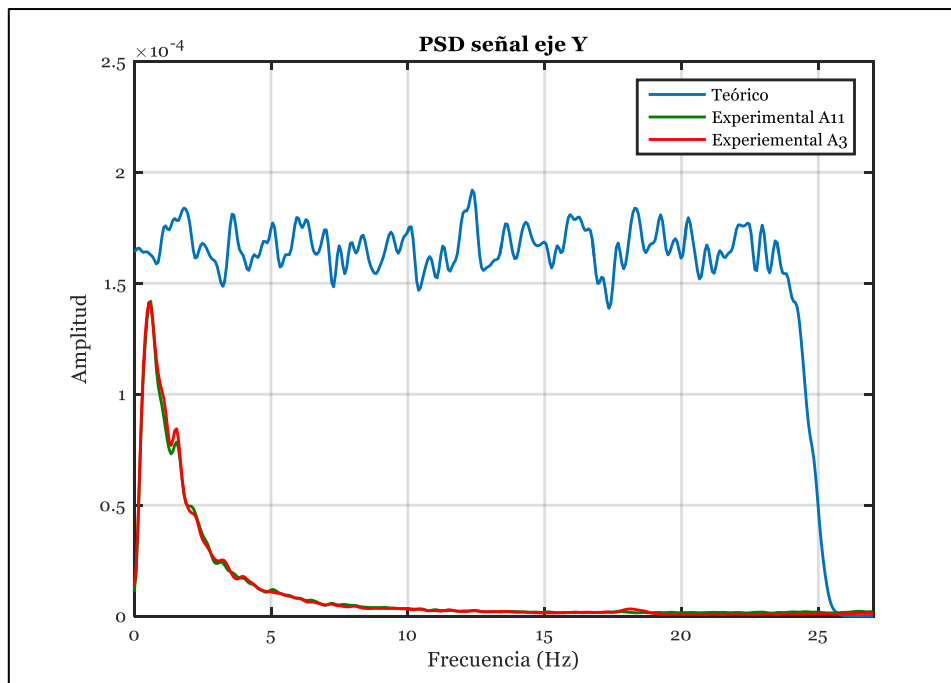


Figura 5.37. Comparación PSD del registro teórico y experimental de aceleraciones basales en eje X, acelerómetros A11 y A3, respectivamente, registro a02vacio000.

En las Figura 5.38 y Figura 5.39 se muestra la función de transferencia de la mesa vibradora, la cual se obtiene al comparar las señales teóricas y experimentales del acelerómetro A12 (dirección eje X) y acelerómetro A11 (dirección eje Y), respectivamente. Notar que se transfieren de forma más efectiva las bajas frecuencias. Se debe señalar fue necesario sincronizar manualmente los datos teóricos y experimentales, por tanto estos resultados son sólo referenciales.

Adicionalmente, en las Figura 5.40 y Figura 5.41 se muestran las funciones de transferencia entre los sensores a nivel basal (A6 y A3) con los que están a una mayor altura instalados en el estanque (A4 y A2), para el eje X e Y, respectivamente, considerando aceleraciones basales AF691. Se observa que en bajas frecuencias (1 Hz a 3 Hz) los gráficos no presentan variación con la presencia de agua en su interior.

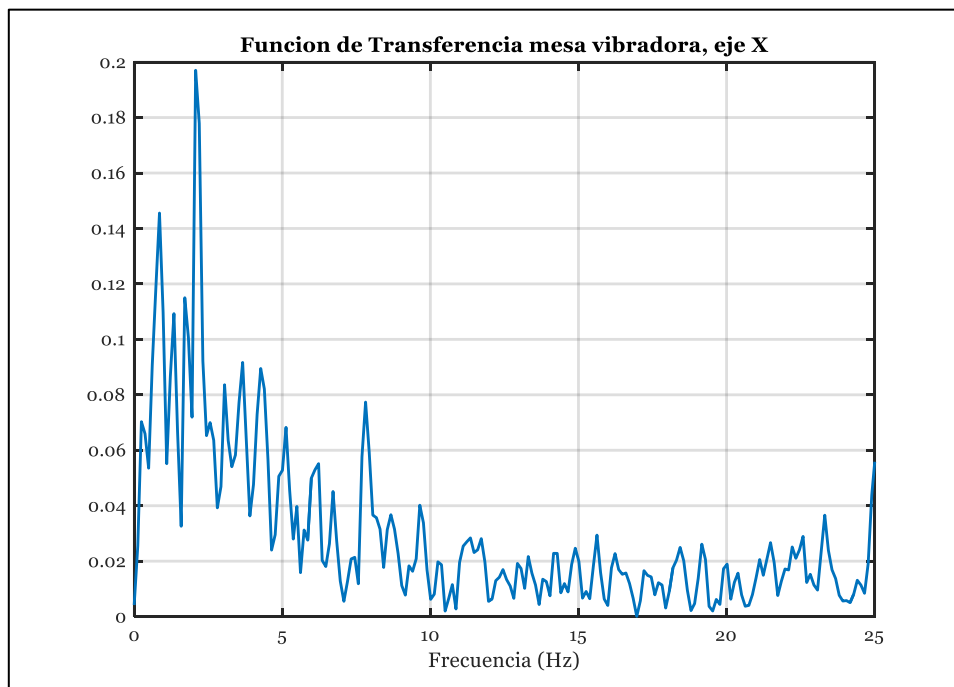


Figura 5.38. Valor absoluto de la función de transferencia (eje X), señal teórica vs acelerómetro A12, registro a02vacio000.

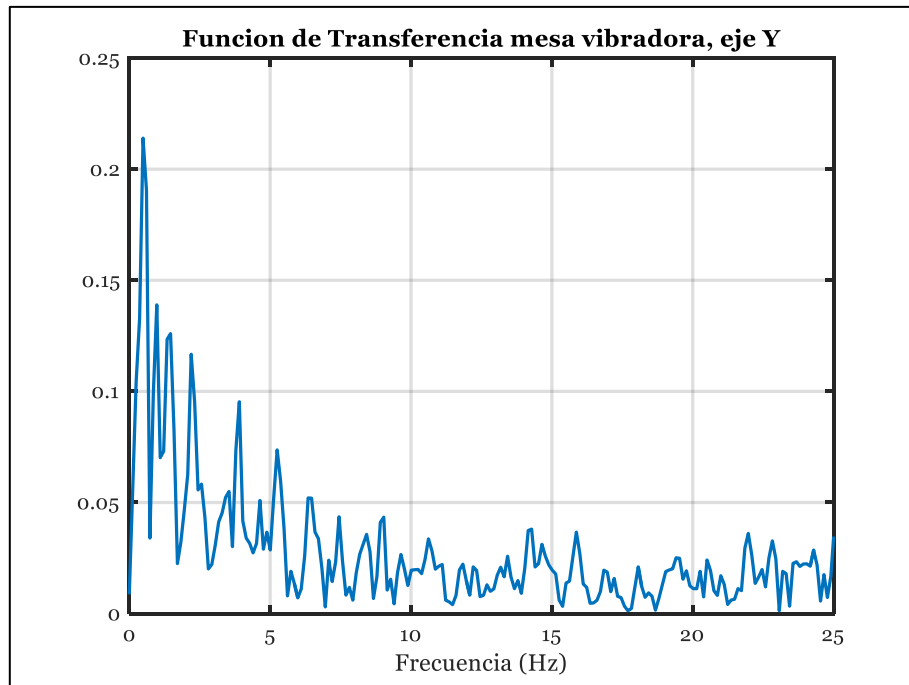


Figura 5.39. Valor absoluto de la función de transferencia (eje Y), señal teórica vs acelerómetro A11, registro a02vacio000.

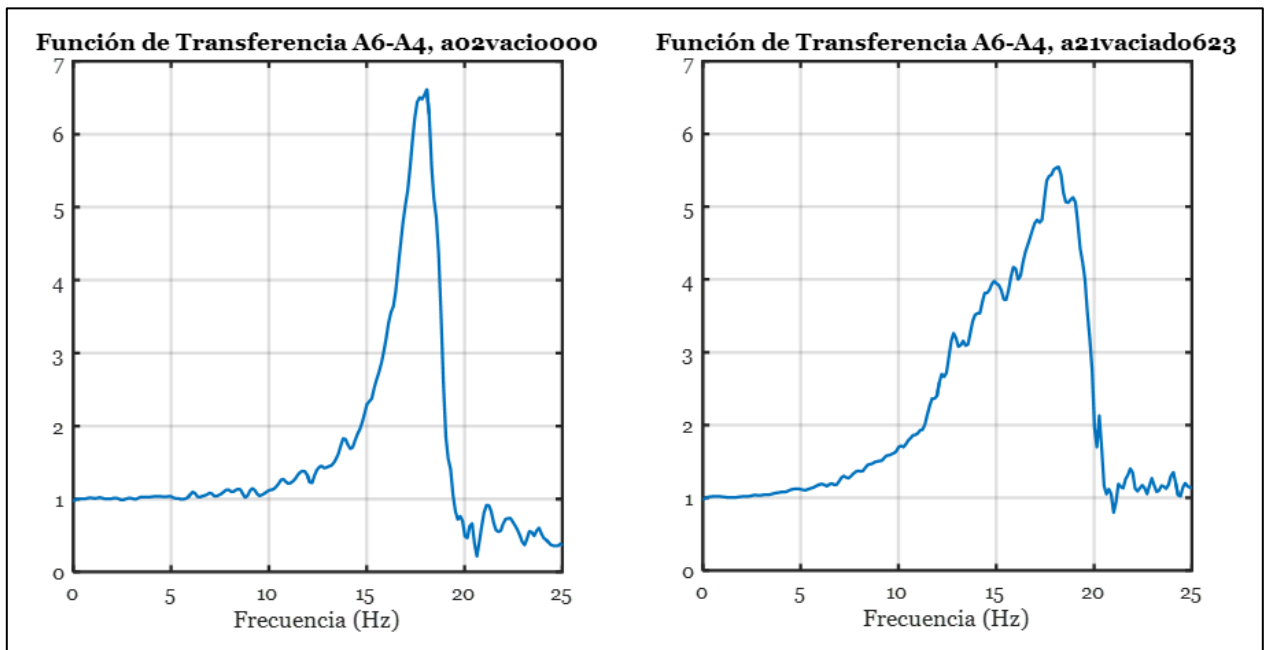


Figura 5.40. Función de transferencia entre sensores A6-A4 (eje X), para estanque vacío y con altura de agua constante en su interior, registros a02vacio000 y a21vaciado623, respectivamente, aceleraciones basales AF691.

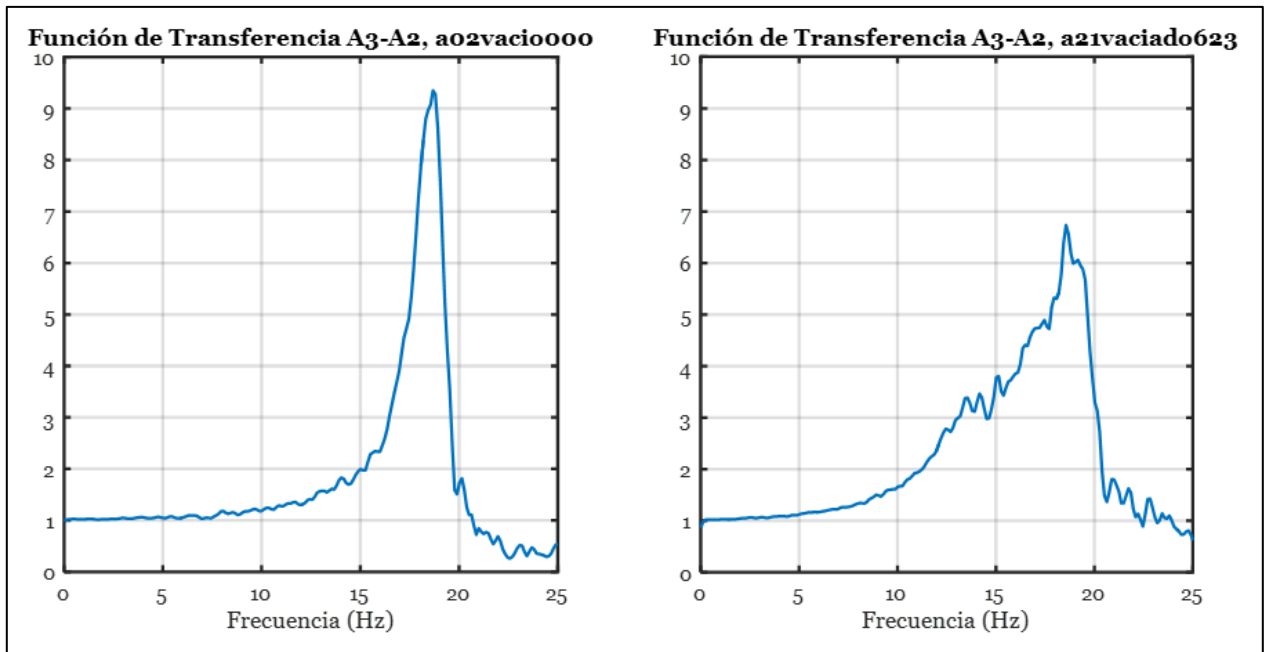


Figura 5.41. Función de transferencia entre sensores A3-A2 (eje y), para estanque vacío y con altura de agua constante en su interior, registros a02vacio000 y a21vaciado623, respectivamente, aceleraciones basales AF691.

5.4. Metodología de Ensayos experimentales

Los ensayos en laboratorio que inducen perturbaciones al sistema principal son clasificados en 2 categorías, la primera corresponde a ensayos de impacto y la segunda a ensayos generados con una forzante en la base inducida por la mesa vibradora. Todos ellos se realizan con el estanque principal montado e instrumentado sobre la mesa vibradora.

El fluido utilizado es agua potable a temperatura ambiente. Sobre el agua, al interior del estanque principal, se dejan flotando pequeñas partículas de polietileno expandido, para obtener una óptima visualización del movimiento superficial del fluido.

Se realizan ensayos con masa constante de agua (a diversos niveles de llenado) y ensayos con acción en la base a medida que el estanque fue vaciado. Aquello se va produciendo gracias a la activación del sistema de secundario, que permite restituir y/o almacenar el agua.

La altura máxima de columna de agua que se ingresó en el estanque principal se limita a 85 cm desde su base, es decir, se considera el estanque lleno si la cantidad de agua al interior alcanza dicha altura, que es la cota máxima medida por las huinchas métricas de costurera adheridas al interior. Esta altura corresponde a un 94,4% de la altura total del estanque (90 cm). En ensayos con excitación sísmica se utilizó una altura máxima de agua de 73,1 cm equivalente a un 81,2% (para registro suave) debido a que durante un movimiento sísmico se genera el modo convectivo que produce una ola que no debiera sobrepasar la altura máxima del estanque.

5.4.1. Ensayos preliminares

Son realizados con el objetivo de determinar el tiempo que toma el vaciado del estanque. Consiste simplemente en verter una gran cantidad de agua al interior del estanque principal, para luego abrir la válvula de salida y cronometrar el tiempo que demora en vaciarse.

Para lo anterior se tienen las siguientes consideraciones:

- La altura de agua inicial es establecida de modo que el oleaje producido por la excitación no sobrepase el techo del estanque conforme a las ecuaciones de Housner.
- Una fracción de la masa de agua no es vaciada debido a la altura a la cual está instalada la válvula de salida.

En este contexto, se observó que el estanque demoraba en vaciarse aproximadamente 9 minutos entre una cota de agua inicial de 75 cm y una final de 10 cm. De esta forma, se consideró apropiado generar registros de excitación de 10 minutos de largo.

5.4.2. Ensayo del tipo pull-back (impactos)

Los ensayos de impacto consisten en suministrar golpes con un martillo de goma en 3 zonas del estanque principal a una altura de 60 cm sobre el nivel basal del estanque, señalados en la Tabla 5.14 y esquematizado en la Figura 5.42, sin la necesidad de activar la mesa, pero siempre obedeciendo los ejes de referencia de ella.

En cada zona se dan 3 golpes con intervalos de tiempo de 5 segundos aproximadamente entre impactos, por lo tanto, cada uno de estos ensayos involucra, 9 impactos y registros de una duración aproximada de 45 segundos.

Se llevan a cabo 19 ensayos de impacto (identificados con las iniciales IMP) a distintos niveles de altura de agua al interior del estanque principal, 9 de ellos con la configuración A de distribución de sensores y los 10 restantes con la configuración B. Los detalles de los registros de salida (outputs) se muestran en las Tabla 5.18 y Tabla 5.19.

Tabla 5.14. Datos zonas de impactos.

Zona	Perturbación	Ángulo (°)	Altura (cm)
1	IMP	226,6	60
2	IMP	124,03	60
3	IMP	351,86	60

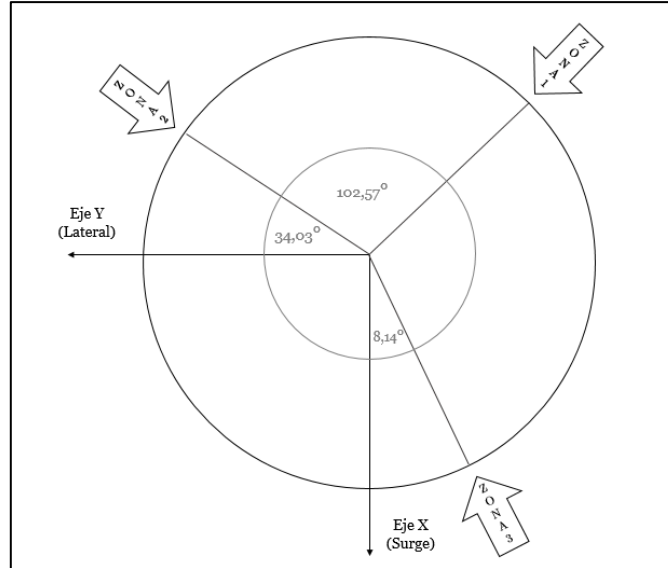


Figura 5.42. Esquema de zonas de golpes de los ensayos de impacto.

5.4.3. Ensayos con excitación basal

Corresponden a los ensayos donde la mesa vibradora es activada para reproducir los registros de aceleraciones aleatorios mostrados anteriormente y registros sísmicos que se encontraban en la base del sistema de almacenamiento de la mesa.

Se reproducen 5 tipos de tipos de excitaciones basales:

- Señales aleatorias del tipo Gaussiano filtradas entre 0 Hz y 25 hz de 10 minutos en dos direcciones generados en forma independiente (X e Y) de movimiento suave (Tabla 5.15).
- Señales aleatorias del tipo Gaussiano filtrado en el rango entre 0 Hz y 25 Hz de 10 minutos en dos direcciones generados en forma independiente (X e Y) de movimiento fuerte (Tabla 5.15).
- Registro sísmico de Concepción 27F al 55%.
- Registro sísmico de Constitución al 50% de una duración de 3 minutos aproximadamente (en dos direcciones).
- Señales aleatorias de 10 minutos en una dirección (X e Y) de movimiento suave.
- Señales aleatorias de 10 minutos en una dirección (X e Y) de movimiento fuerte.

Para los registros de aceleraciones aleatorios, se vació el agua almacenada durante el tiempo.

5.4.3.1. Sismo aleatorio en dos direcciones

Con el uso de las rutinas en Matlab para generar registros en la mesa vibradora se generaron archivos binarios “joystickXXX”, relacionados a los movimientos aleatorios en dos direcciones simultáneamente para sismo suave y fuerte, ver Tabla 5.15 .

El sistema principal con la configuración A de sensores fue sujeta a este tipo de acciones basales.

En particular, se realizan 3 ensayos con apertura de válvula del estanque principal, es decir, con variación de volumen (masa) en el tiempo y se señalan en la Tabla 5.18.

Tabla 5.15. Datos registros sísmicos aleatorios en dos direcciones.

Tipo de registro en mesa vibradora	Nombre archivo reproducido	Duración (min)	Frecuencia de muestreo (Hz)	Ident.
Aleatorio suave en dos direcciones	joystick692	10	60	AS692
Aleatorio fuerte en dos direcciones	joystick691	10	60	AF691

5.4.3.2. Sismos de Concepción al 55% y Constitución al 50%

Dado su corto intervalo tiempo que contienen estos sismos no se realiza variación de masa con estos registros.

Tabla 5.16. Datos registros sísmicos en tres direcciones.

Tipo de sismo de mesa vibradora	Nombre archivo reproducido	Ident.	Duración (min)	Frecuencia de muestreo (Hz)
Concepción al 55%	CONC	CONC	3 aprox.	60
Constitución al 50%	CONS	CONS	3 aprox.	60

5.4.3.3. Sismo aleatorio en una dirección

Análogo a 5.4.3.1 se crea un archivo reproducible por la mesa vibradora, con la diferencia que para este caso, cada archivo está compuesto por una característica de sismo (suave o fuerte) y sólo una dirección (X o Y), ver Tabla 5.17.

El sistema con la configuración B de sensores fue sujeto a este tipo de acciones basales.

Los ensayos con vaciado del estanque principal fueron un total de 5 y se señalan en la Tabla 5.19.

Tabla 5.17. Datos registros sísmicos aleatorios en una dirección

Tipo de registro en mesa vibradora	Nombre registro reproducido	Duración (min)	Frecuencia de muestreo (Hz)	Ident.
Aleatorio suave en eje X	joystick694	10	60	AS694
Aleatorio suave en eje Y	joystick696	10	60	AS696
Aleatorio fuerte en eje X	joystick693	10	60	AF693
Aleatorio fuerte en eje Y	joystick695	10	60	AF695

5.4.4. Matrices de ensayo

En las Tabla 5.18 y Tabla 5.19 se muestran los ensayos en orden cronológico en cual fueron efectuados, señalándose el tipo de excitación generada, el nombre de los registros de datos adquiridos, la tasa de muestreo que se empleó, la cota inicial de agua en porcentaje (Recordar que se considera que la altura máxima de llenado de estanque $h_{m\acute{a}x}$, es de 85 cm.) y observaciones de los ensayos donde hubo variación de masa.

Los nombres de los registros de salida son nombrados siguiendo el siguiente patrón:

- i. El primer carácter debe señalar el tipo de configuración de sensores (a o b).
- ii. Luego se señala el número del ensayo cronológicamente.
- iii. Se continúa indicando la característica principal del ensayo.
- iv. Por último, se coloca la altura de agua contenida al interior del estanque en mm.

Tabla 5.18. Matriz de ensayo 1, configuración A de sensores.

N°	$Ident_{sismo}$	Output	Fs (Hz)	% $_{llenado}$	V_{emata} (L)	V_{sclida} (L)	$h_{inicial}$ (cm)	h_{final} (cm)	V_{final} (L)
1	AS692	a01vacio000	1000	0,00%	0	0	0,00	0,00	0
2	AF691	a02vacio000	1000	0,00%	0	0	0,00	0,00	0
3	IMP	a03pullback590	1000	69,41%	149,85	0	59,00	59,00	149,85
4	AS692	a04suave590	1000	69,41%	0	0	59,00	59,00	149,85
5	AF691	a05fuerte590	1000	69,41%	0	0	59,00	59,00	149,85
6	CONS	a06constitucion590	1000	69,41%	0	0	59,00	59,00	149,85
7	CONC	a07concepcion590	1000	69,41%	0	0	59,00	59,00	149,85
8	IMP	a08pullback735	1000	86,47%	37,68	0	73,50	73,50	187,53
9	AS692	a09suave735	1000	86,47%	0	0	73,50	73,50	187,53
10	AS692	a10vaciado735	1000	86,47%	0	118,80	73,50	28,00	68,73
11	IMP	a11pullback731	1000	86,00%	117,32	0	28,00	73,10	186,05
12	AS692	a12vaciado731	1000	86,00%	0	152,30	73,10	13,70	33,75
13	IMP	a13pullback137	1000	16,12%	0	0	13,70	13,70	33,75
14	AS692	a14suave137	1000	16,12%	0	0	13,70	13,70	33,75
15	IMP	a15pullback230	1000	27,06%	24,00	0	13,70	23,00	57,75
16	IMP	a16pullback338	1000	39,76%	28,65	0	23,00	33,80	86,40
17	IMP	a17pullback460	1000	54,12%	32,1	0	33,80	46,00	118,50
18	AS692	a18suave460	1000	54,12%	0	0	46,00	46,00	118,50
19	IMP	a19pullback559	1000	65,76%	25,90	0	46,00	55,90	144,40
20	IMP	a20pullback623	1000	73,29%	23,10	0	55,90	62,30	161,00
21	AF691	a21vaciado623	1000	73,29%	0	120,11	62,30	15,50	40,89
22	CONS	a22constitucion457	1000	53,76%	80,50	0	45,70	45,70	121,39

Tabla 5.19. Matriz de ensayo 2, configuración B de sensores.

N°	$Ident_{sismo}$	Output	F_s (Hz)	$\% \eta_{tenaco}$	$V_{entrada}$ (L)	V_{salida} (L)	$h_{inicial}$ (cm)	h_{final} (cm)	$V_{inicial}$ (L)	V_{final} (L)
1	IMP	b01pullback000	1000	0,00%	0	0	0,00	0,00	0	0
2	IMP	b02pullback105	1000	12,35%	24,40	0	0,00	10,50	0	24,40
3	IMP	b03pullback202	1000	23,76%	25,10	0	10,50	20,20	24,40	49,50
4	IMP	b04pullback315	1000	37,06%	29,95	0	20,20	31,50	49,50	79,45
5	IMP	b05pullback405	1000	47,65%	23,55	0	31,50	40,50	79,45	103,00
6	IMP	b06pullback503	1000	59,18%	25,60	0	40,50	50,30	103,00	128,60
7	IMP	b07pullback601	1000	70,71%	26,10	0	50,30	60,10	128,60	154,70
8	IMP	b08pullback683	1000	80,35%	22,30	0	60,10	68,30	154,70	177,00
9	IMP	b09pullback756	1000	88,94%	15,00	0	68,30	75,60	177,00	192,00
10	IMP	b10pullback803	1000	94,47%	12,50	2,55	75,60	80,30	192,00	201,95
11	-	b11vaciado803	1000	94,47%	0,00	152,60	80,30	20,10	201,95	49,35
12	AS694	b12vaciado603	1000	70,94%	103,00	134,45	60,30	8,70	152,35	17,90
13	AS696	b13vaciado694	1000	81,65%	154,50	134,35	69,40	15,00	172,30	38,05
14	AF693	b14vaciado601	1000	70,71%	108,30	127,90	60,10	9,00	146,35	18,45
15	AF695	b15vaciado672	1000	79,06%	144,10	96,00	67,20	28,70	162,55	66,55

Capítulo 6

Identificación de propiedades dinámicas mediante métodos de Análisis Modal

Los registros de respuesta de aceleraciones obtenidos en los ensayos experimentales son procesados mediante los métodos de identificación de propiedades dinámicas expuestos en el Capítulo 4 y los resultados de cada uno de ellos se detallan en este capítulo.

Los resultados mostrados a continuación están sujetos a las siguientes consideraciones:

- La posición de los acelerómetros instrumentados en el estanque principal se supone en el plano horizontal y radial del estanque.
- Los datos de los sensores ultrasónicos no son considerados en el análisis debido a que sus mediciones no capturaron correctamente la altura del líquido debido a que el líquido en el nivel más alto se acercaba a la máxima distancia de medición, por lo que estos datos no fueron útiles.
- Se supone que la respuesta del estanque es elástica-lineal por pequeñas ventanas de tiempo.

6.1. Identificación de propiedades dinámicas a partir de ensayos de impacto a través del método de Ibrahim en el dominio del tiempo (ITD)

Los resultados de identificación de propiedades dinámicas asociados a este método se logran por medio del análisis de registros de respuesta de aceleración obtenidos del ensayo experimental de impactos descrito en el Capítulo 5. En el mismo capítulo, se detalla que aquel tipo de ensayo se realiza para la configuración A y B de instrumentación de acelerómetros, empleando diversas cotas de aguas que son invariantes en el tiempo.

El set de figuras expuesto en esta sección, contiene gráficos que muestran la amplitud de la respuesta de la estructura producto de los 9 impactos del ensayo pullback y una ventana de tiempo que selecciona el registro asociado a la respuesta de los 9 impactos generados en cada ensayo.

Los límites de la ventana de tiempo se obtienen mediante inspección del gráfico de respuesta, para luego ser ingresados al programa. Para establecer la confiabilidad y estabilidad de los parámetros dinámicos identificados se emplean diversos números de retardos (i) (0,015s; 0,025s; 0,035s; 0,045s; 0,065s; 0,075s; 0,095s) de manera de estudiar la consecuencia o repetitividad de los resultados y descartar resultados inexactos que se producen para algunos retardos empleando ITD.

Del análisis de la ventana de tiempo, se obtienen las primeras 6 frecuencias naturales, formas modales y amortiguamientos para los diversos retardos escogidos dentro de la ventana de tiempo seleccionada.

Junto a los gráficos mencionados inicialmente, se presentan las frecuencias naturales y formas modales identificadas de la estructura.

Posteriormente, se promedian las frecuencias cercanas y las razones de amortiguamiento, obtenidos de diversos ensayos que presentan una forma modal igual o similar. Este resultado se detalla en la Tabla 6.1.

A continuación se aplica la metodología explicada recientemente para los registros de respuesta de aceleraciones a08pullback735 (altura de agua inicial $h = 73,5 \text{ cm}$) y b07pullback601 (altura de agua inicial $h = 60,1 \text{ cm}$), con el fin de ejemplificar el procedimiento de identificación de propiedades dinámicas con el método ITD.

Tanto las frecuencias y formas modales presentan resultados estables observándose una dispersión no mayor a 0,25 Hz en la frecuencia para el primer y segundo modo (2,5% de error con respecto a su valor nominal) entre ensayos repetitivos y menor a 1 Hz a los modos superiores. Con respecto a las razones de amortiguamiento obtenidas, presentan una dispersión menor al 1%. Lo anterior está expuesto en el Anexo E.

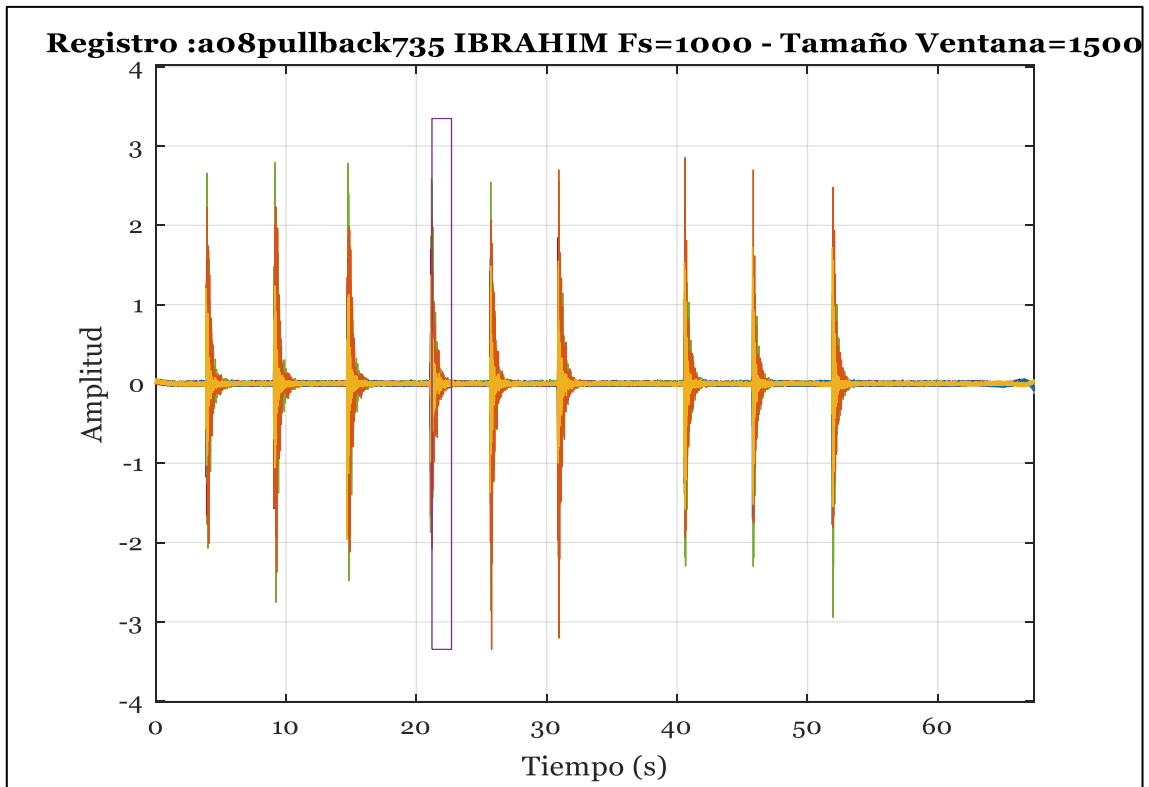


Figura 6.3. Selección de ventana, 1º impacto en la zona 2, configuración A de sensores.

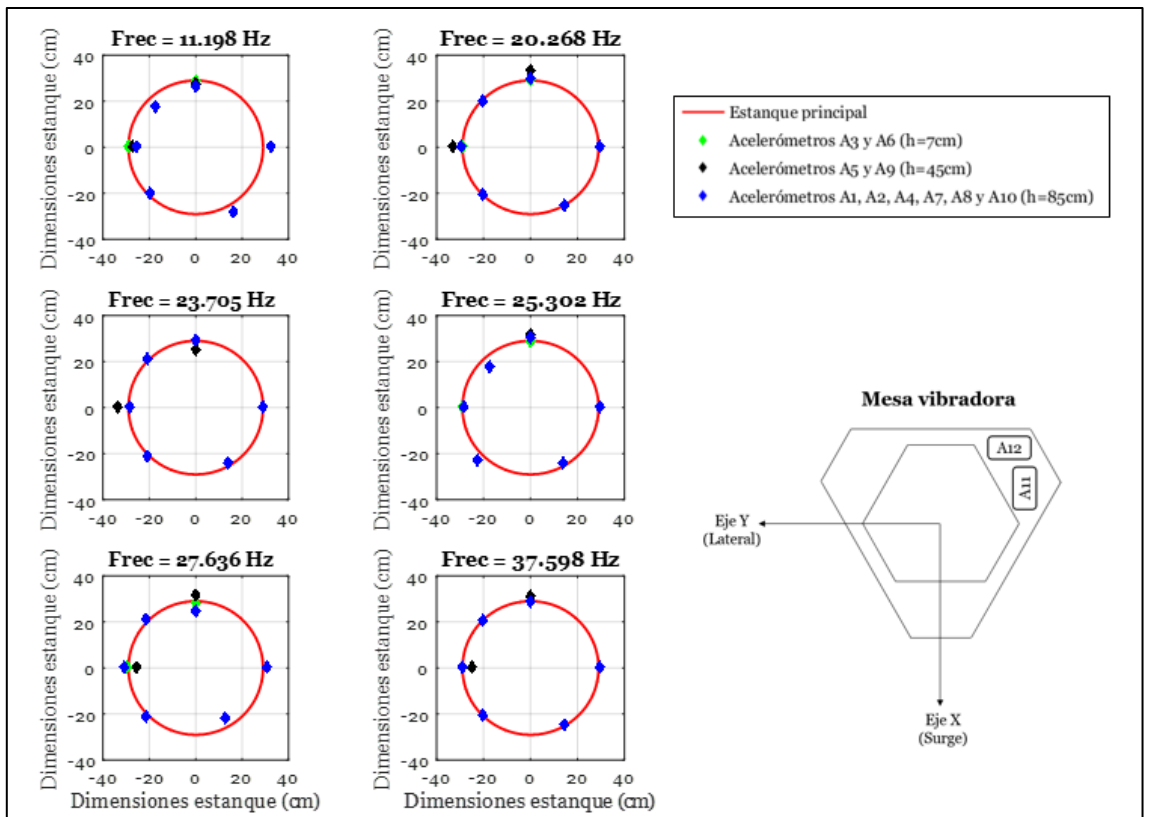


Figura 6.4. Formas modales, 1º impacto en la zona 2, configuración A de sensores.

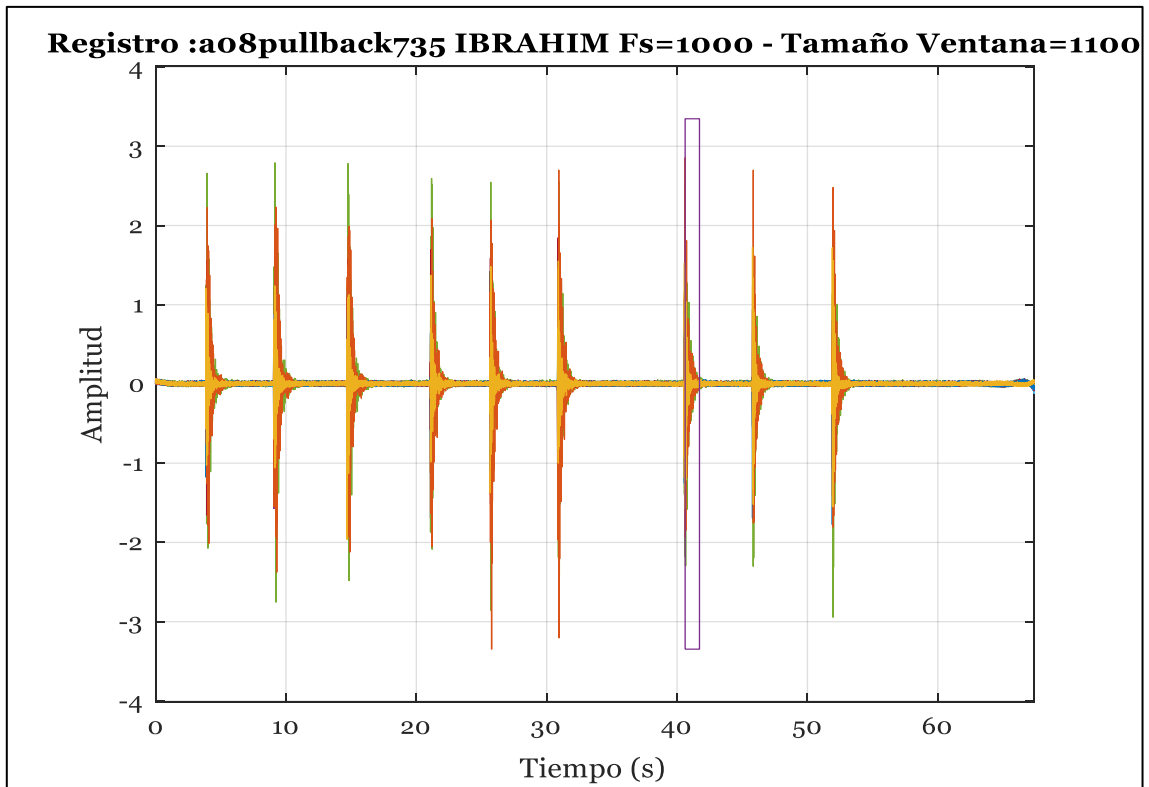


Figura 6.5. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 3, configuración A de sensores.

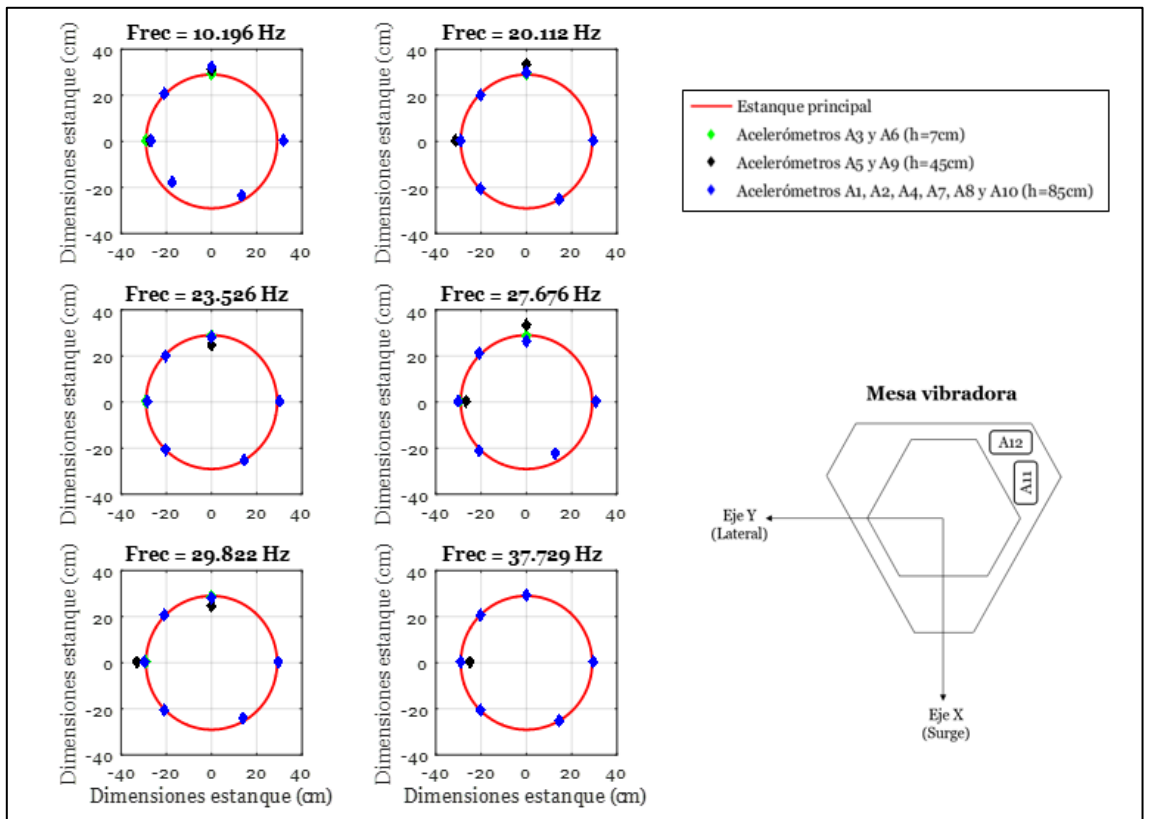


Figura 6.6. Formas modales, 1° impacto en la zona 3, configuración A de sensores.

6.1.2. Registro de respuesta de aceleración b07pullback601

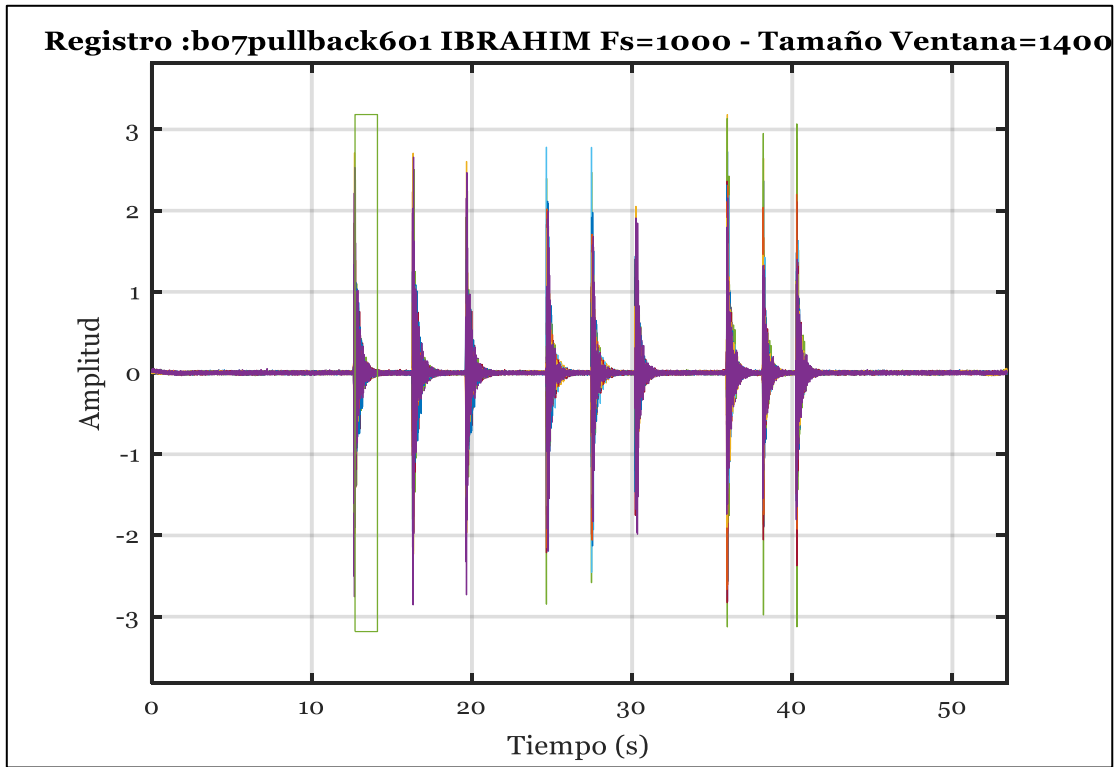


Figura 6.7. Selección de ventana, 1º impacto en la zona 1, configuración B de sensores.

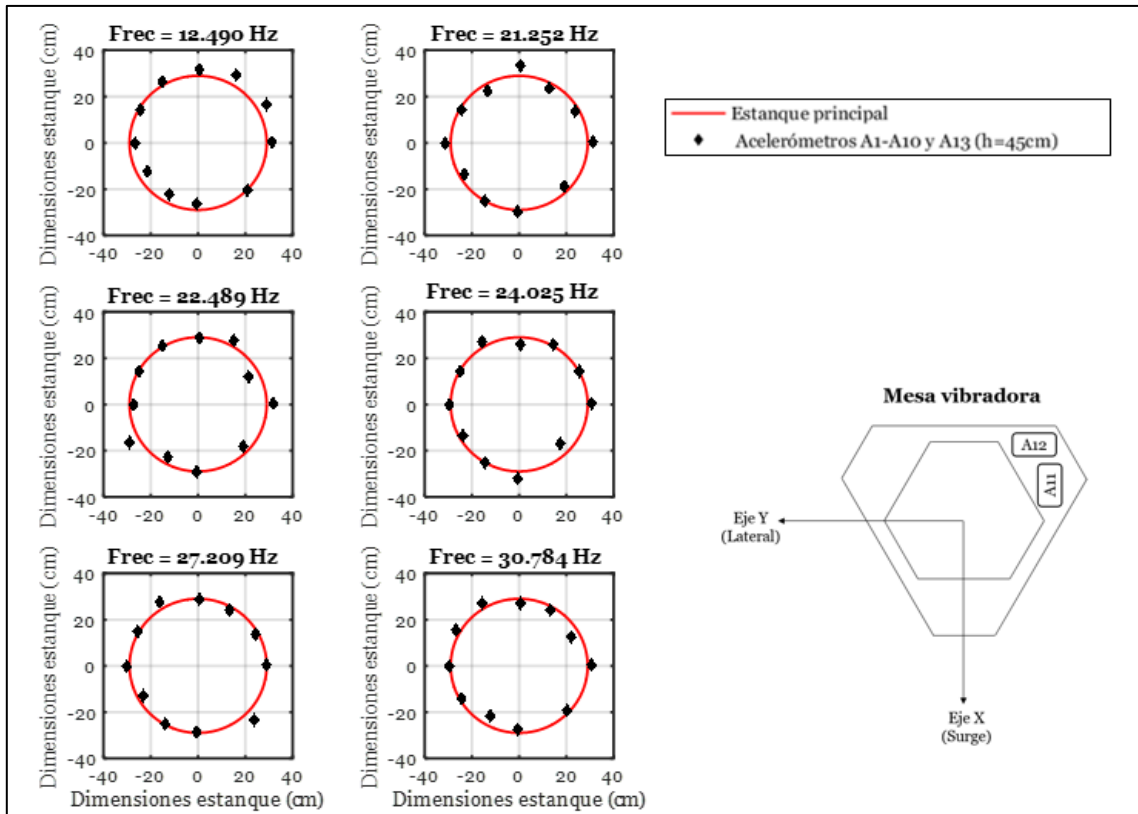


Figura 6.8. Formas modales, 1º impacto en la zona 1, configuración B de sensores.

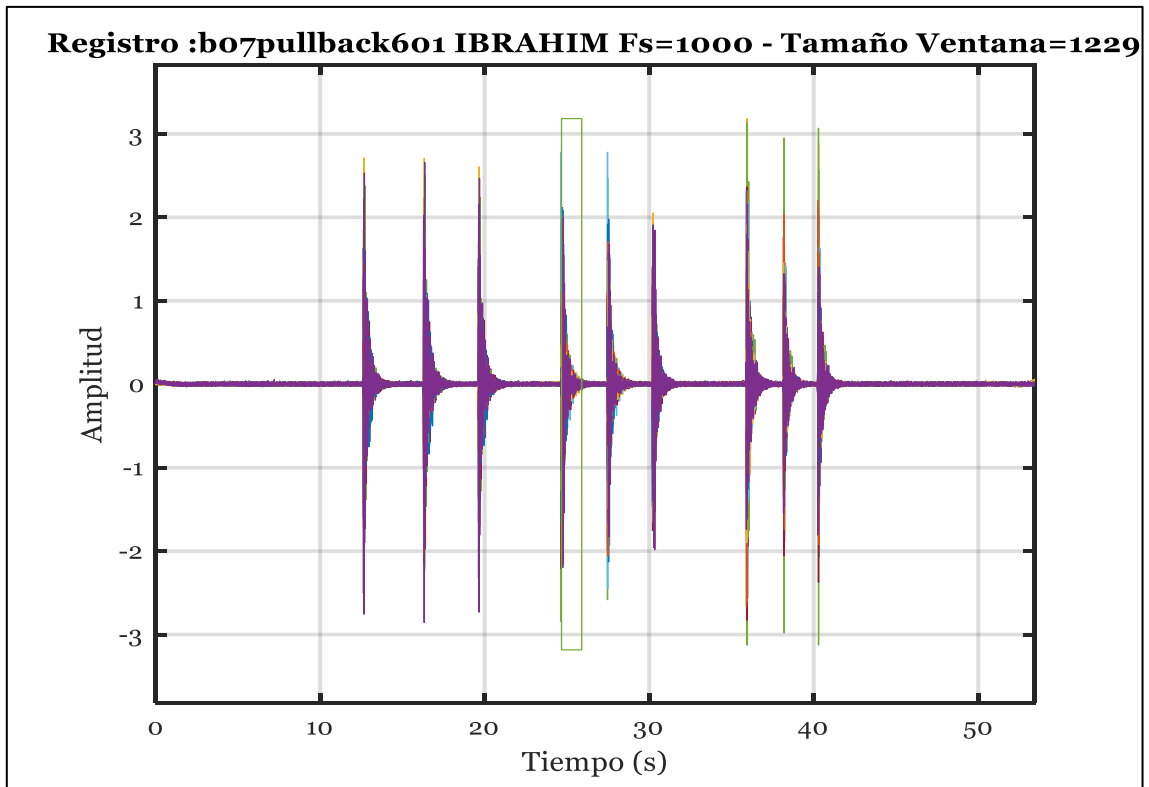


Figura 6.9. Selección de ventana, 1º impacto en la zona 2, configuración B de sensores.

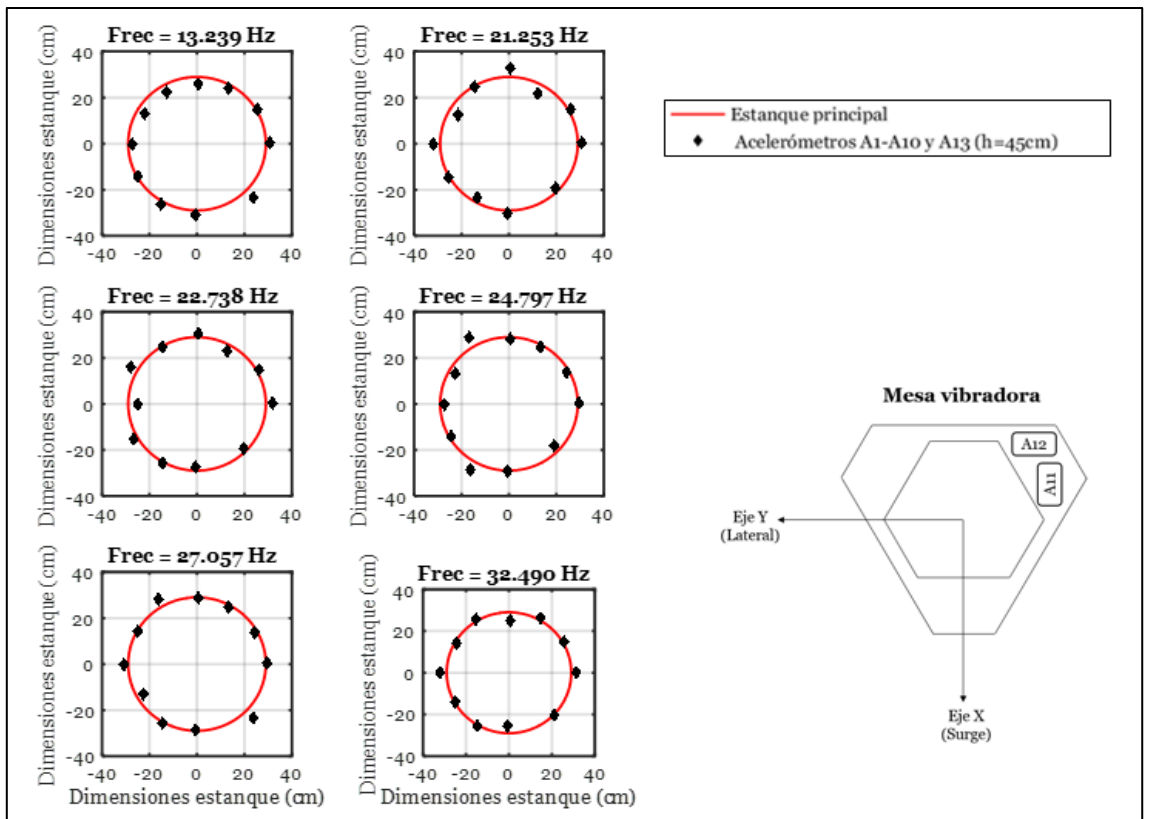


Figura 6.10. Formas modales, 1º impacto en la zona 2, configuración B de sensores.

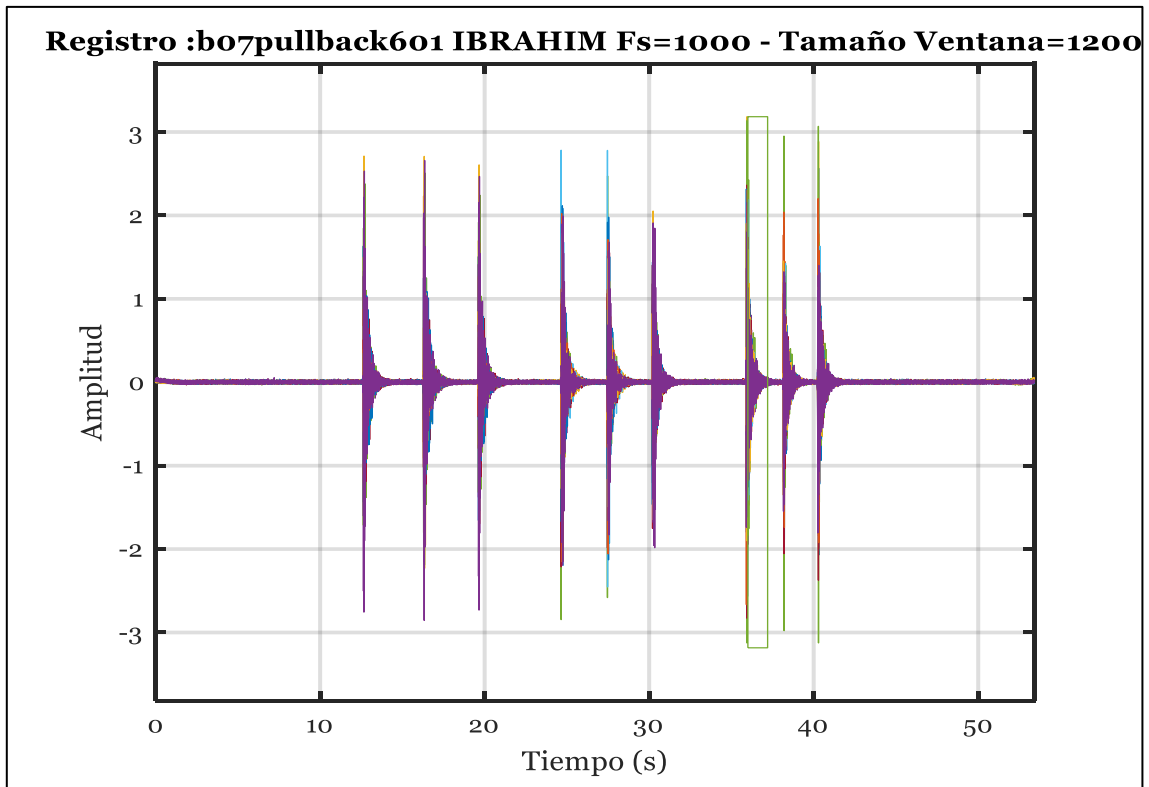


Figura 6.11. Selección de ventana, 1° impacto en la zona 3, configuración B de sensores.

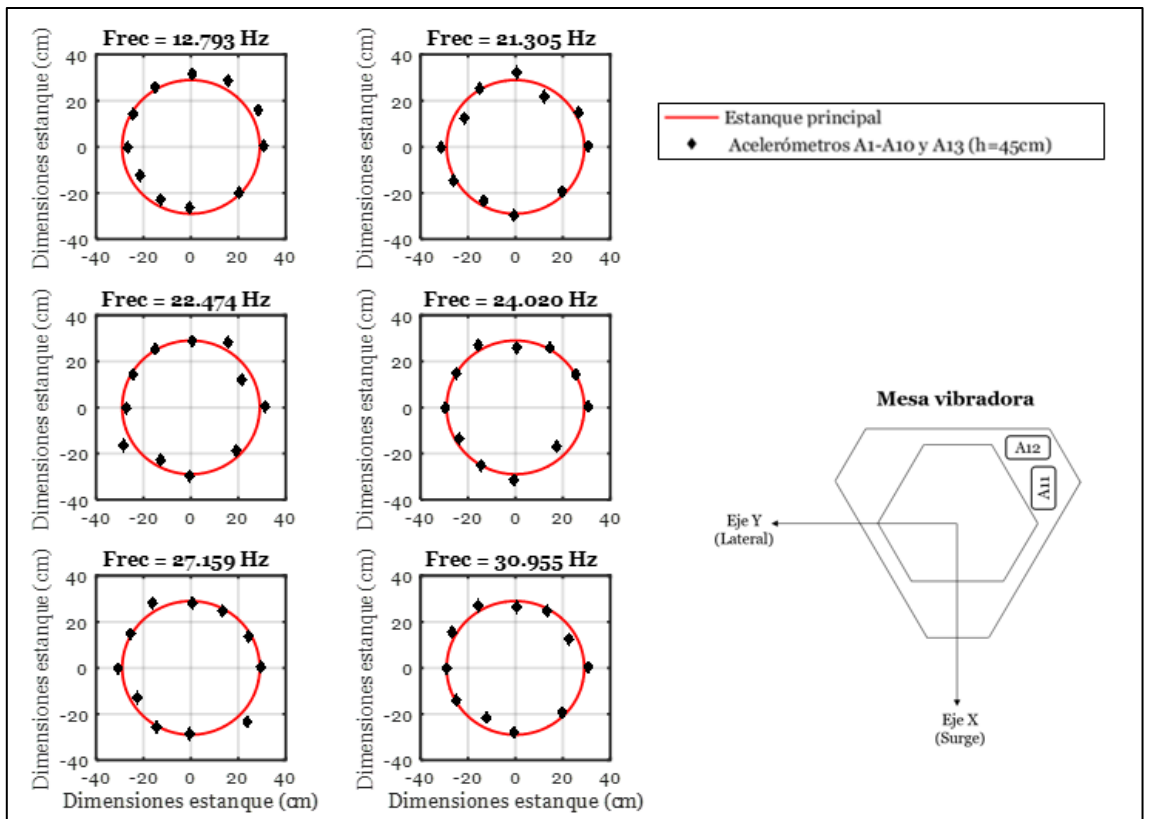


Figura 6.12. Formas modales, 1° impacto en la zona 3, configuración B de sensores.

6.1.3. Resumen y análisis de resultados, método ITD

En el Anexo E, se presentan los resultados obtenidos asociados a frecuencias y razones de amortiguamiento identificadas para cada ensayo y para cada impacto.

A continuación, se resumen los resultados obtenidos con el método ITD en la Tabla 6.1, donde se muestran los promedios de las frecuencias y razones de amortiguamiento identificadas. Los datos de dicha tabla son graficados en la Figura 6.13.

Utilizando los datos experimentales de la Tabla 9.2 del Anexo A y haciendo una asociación entre la altura de agua y el tiempo asociada al ensayo n° 12 de la configuración A de sensores (registro de salida a12vaciado731), se obtiene el gráfico frecuencias v/s tiempo que se muestra en la Figura 6.14. Notar que el estanque, no se vacía completamente debido a que la cota de la válvula está sobre la base del estanque, por lo que queda una porción de agua al interior de él, es por ello que el gráfico de la Figura 6.14 considera el tiempo de vaciado hasta una altura de agua de 13,7 cm.

De las dos figuras mencionadas, se aprecia que los modos identificados se asocian a la respuesta impulsiva del estanque, sin observarse el efecto del modo convectivo. Además, se identifican dos modos de vibrar que predominan la respuesta que se asocian a frecuencias muy cercanas y que se caracterizan por ser prácticamente perpendiculares entre ellos. La frecuencia fundamental de la forma modal que se mueve en dirección noroeste (según orientación de mesa vibradora, ver Figura 9.8) es levemente mayor que el otro.

El vaciado del estanque en el tiempo provoca que se incremente la frecuencia de la estructura variando aproximadamente entre un rango de 10 Hz a 20 Hz para los dos primeros modos, y se observa que las frecuencias varían en forma casi lineal con la altura de llenado y se observa además un leve cambio de pendiente a una altura de llenado de unos 55 cm aproximadamente.

Por otro lado, las frecuencias de los modos identificados sobre los 20 Hz presentan una dispersión mayor; sin embargo, la tendencia de las curvas que los describen es creciente, pero con una variación más abrupta de frecuencias que la de los modos 1 y 2.

En cuanto a las razones de amortiguamiento, a pesar de su inestabilidad, presentan valores bajo el 5% en general.

Tabla 6.1. Resumen de Frecuencias y razones de amortiguamientos promedio de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque, configuración A y B de sensores.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	Modo 1		Modo 2		Modo 3		Modo 4		Modo 5		Modo 6	
			f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)
73,50	187,53	202,96	10,29	2,43	11,16	2,08	20,32	2,30	23,40	2,30	25,78	3,41	28,32	2,51
73,10	186,05	201,48	10,42	2,63	11,30	1,91	20,37	3,24	23,39	2,44	26,00	3,19	28,34	2,46
68,30	177,00	192,42	11,20	4,24	12,01	3,18	20,52	1,65	23,33	1,55	26,18	2,16	29,35	1,55
62,30	161,00	176,43	11,94	5,84	12,61	4,45	20,83	2,20	23,66	2,14	26,39	2,85	29,96	2,13
60,10	154,70	170,12	12,63	4,35	13,08	6,00	21,27	1,60	24,08	1,59	27,18	1,77	30,74	2,45
55,90	144,40	159,83	13,84	3,88	14,01	4,18	22,08	2,29	24,59	2,49	28,12	2,04	30,76	2,51
50,30	128,60	144,02	14,12	3,88	14,72	4,45	24,11	1,62	25,24	1,70	29,57	1,71	31,91	1,63
46,00	118,50	133,93	15,69	4,08	16,36	4,81	25,99	2,35	27,20	2,43	31,47	1,83	32,64	1,90
40,50	103,00	118,42	16,13	3,86	16,46	4,60	N.I.	N.I.	29,80	2,07	31,67	1,83	34,55	1,67
33,80	86,40	101,83	16,63	2,83	17,00	3,58	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	39,26	2,34
31,50	79,45	94,87	16,60	3,17	16,65	2,69	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
23,00	57,75	73,18	17,37	3,48	17,72	3,72	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
20,20	49,50	64,92	18,15	1,85	18,84	3,01	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
13,70	33,75	49,18	18,01	2,83	18,70	2,29	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
10,50	24,40	39,83	18,17	3,03	18,42	2,51	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
0	0	15,43	18,25	2,97	18,78	2,30	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.

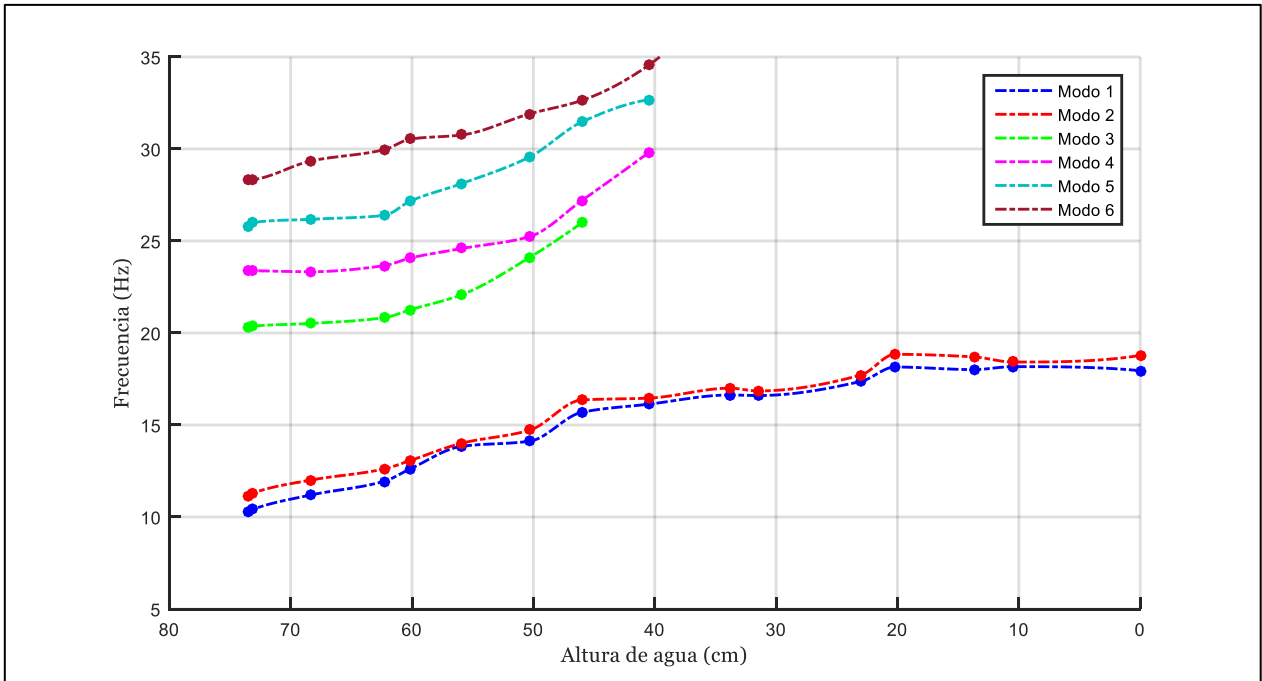


Figura 6.13. Variación de frecuencia de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque.

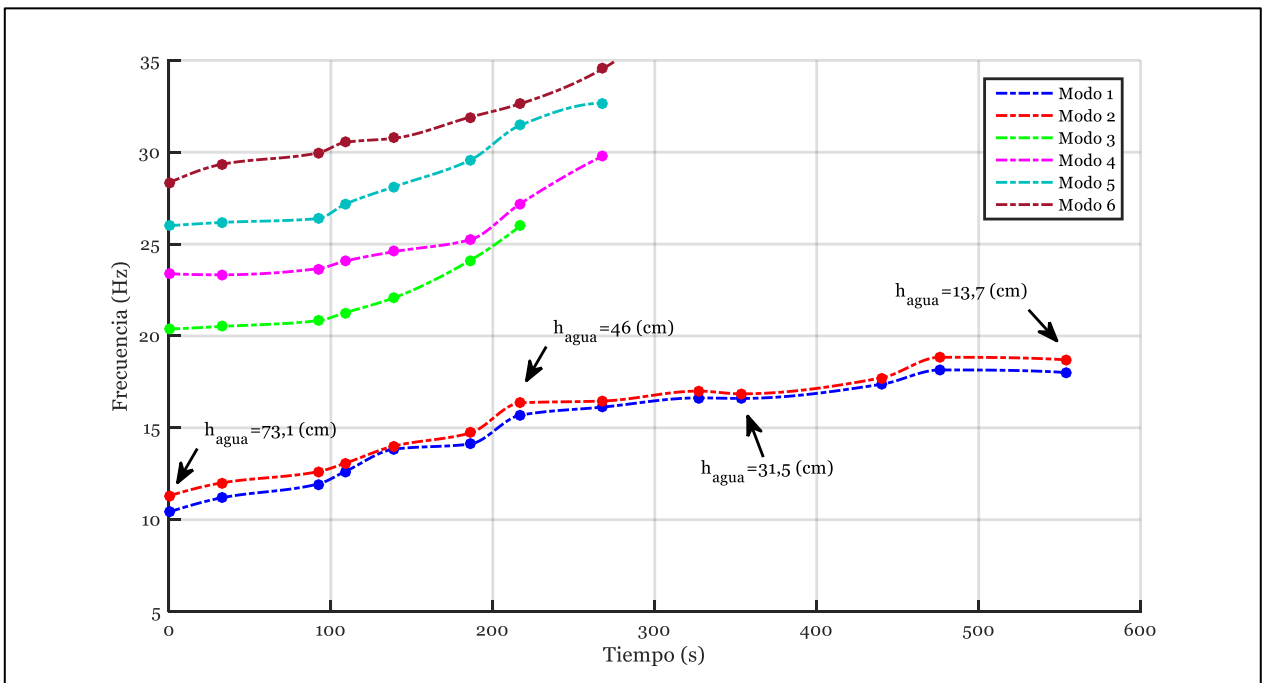


Figura 6.14. Variación de frecuencia de cada modo identificado con respecto al tiempo (asociada a ensayo n° 12 configuración A de sensores).

6.1.3.1. Análisis de las formas modales perpendiculares

Complementario a lo anterior, se realiza un análisis de la proyección de las primeras dos formas modales identificadas que se encuentran muy cercanas en cuanto al valor de sus frecuencias.

El análisis del desplazamiento de las formas modales 1 y 2, se muestran en la Figura 6.15 y Figura 6.16, respectivamente.

Para obtener una aproximación de la dirección de las dos primeras formas modales, se realizan dos tipos de análisis, el primero consiste en trazar numerosas circunferencia del mismo diámetro del estanque con línea segmentada que intersecta, al menos, tres acelerómetros (representados por diamantes negros), así, la circunferencia que intersecta la mayor cantidad de acelerómetros corresponde a la mejor aproximación y se obtiene su centro, el cual se muestra en la Tabla 6.2 para cada forma modal. El segundo análisis corresponde a obtener los desplazamientos de los sensores y calcular el centro de gravedad. Ambos arrojan resultados similares. No se consideran efectos de ovalamiento para este análisis, el cual podría obtenerse algo más preciso al trabajar con figuras elípticas.

Además, se observa el MAC entre formas modales obtenidas para la configuración A y configuración B y se muestra en las Figura 6.17 y Figura 6.18, respectivamente. De esta forma se puede concluir que los primeros modos a pesar de poseer frecuencias cercanas son significativamente distintos al ser prácticamente perpendiculares y poseer un MAC bajo.

Tabla 6.2. Movimiento de la circunferencia de aproximación de cada modo.

Parámetro	Forma Modal	Forma Modal
	1	2
Coordenada centro estanque principal	(0,0)	(0,0)
Coordenada centro de circunferencia de aproximación	(3.02,2.64)	(2.13, -3.25)
Dirección con respecto al eje X de la mesa vibradora	48,83°	146,72°

A partir de la estimación del desplazamiento del centro de gravedad del estanque se observa que los primeros dos modos perpendiculares se producen debido a la simetría de la estructura y tienen un ángulo que los separa de 98°. Es decir, son prácticamente perpendiculares.

Se aprecia que la dirección de cada forma modal se proyectaba por coincidencia con la dirección de los golpes de los ensayos de impacto (impacto 1 y 2). De esta forma, los impactos excitaban principalmente al modo que se proyectaba en la dirección del impacto. Así entonces, en estas identificaciones se solía observar sólo uno de los primeros dos modos, que correspondía al que presentaba mayor excitación.

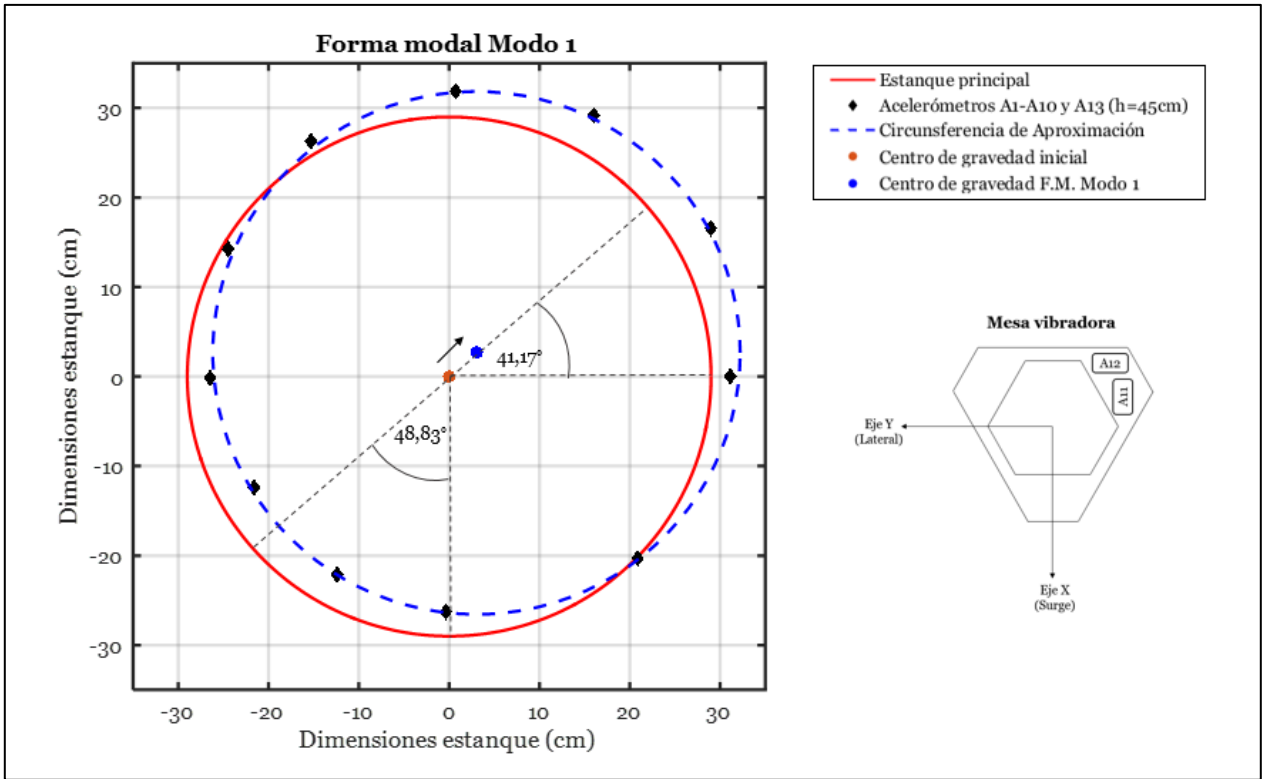


Figura 6.15. Forma modal del modo 1 (ensayo n°7 configuración B de sensores, b07pullback601).

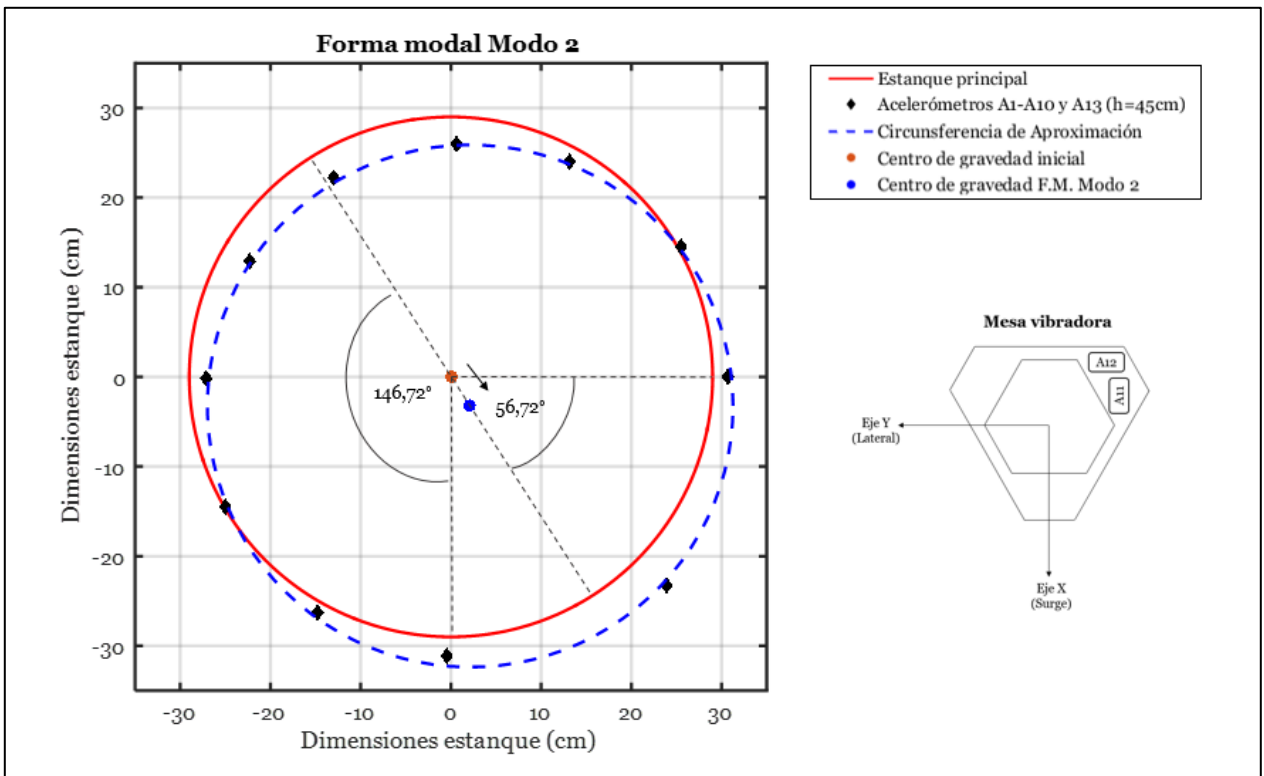


Figura 6.16. Forma modal del modo 2 (ensayo n°7 configuración B de sensores, b07pullback601).

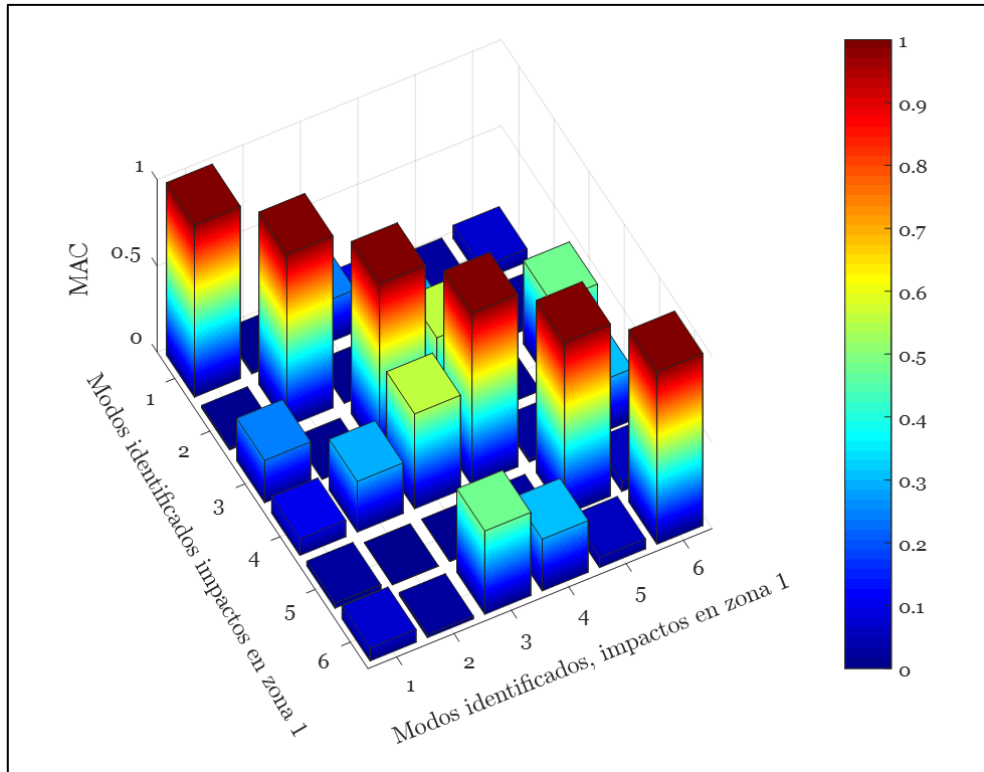


Figura 6.17. MAC entre las primeras 6 formas modales identificadas de la estructura, configuración A de sensores, registro a11pullback731.

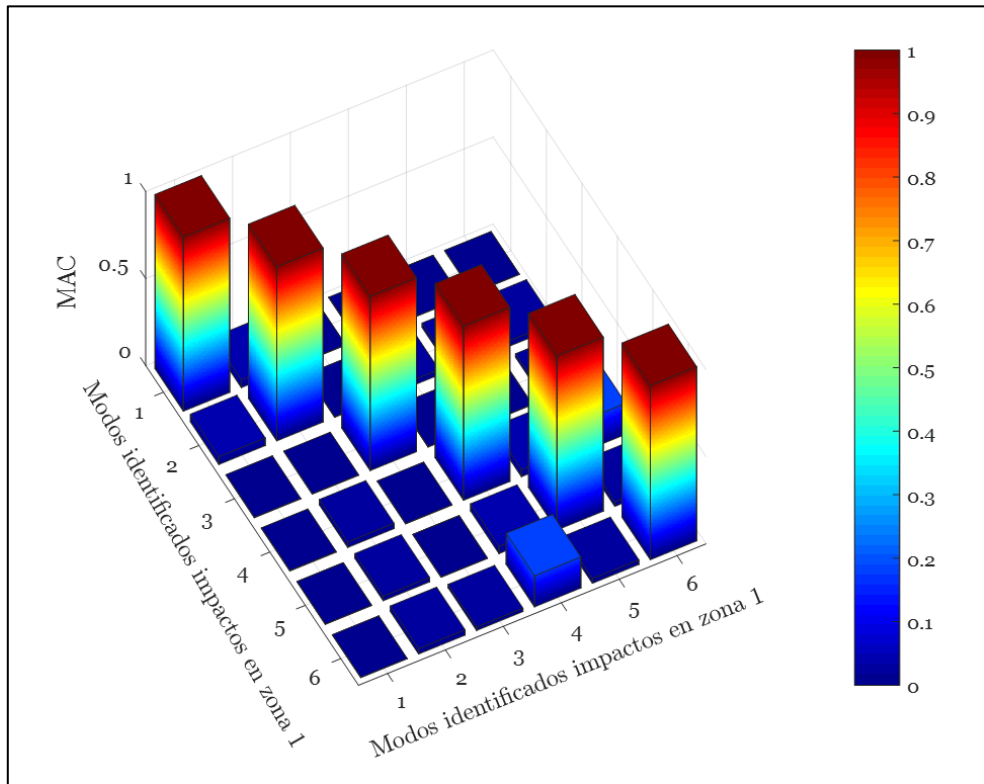


Figura 6.18. MAC entre las primeras 6 formas modales identificadas de la estructura, configuración B de sensores, registro b07pullback601.

6.2. Método de Identificación Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI)

6.2.1. Identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo

Se realiza un análisis considerando pequeñas ventanas de tiempo de los datos de entrada y salida en las cuales se considera que la estructura se comporta elástica-lineal durante las pequeñas ventanas de tiempo. De esta forma, se capturará la variación de las propiedades dinámicas a lo largo del tiempo.

Se aplica el análisis por pequeñas ventanas de tiempo a los registros de respuesta del estanque de almacenamiento cuando es vaciado en el tiempo a distintas alturas de columna de agua en su interior. Los resultados que se muestran a continuación corresponden a los parámetros identificados para dos ensayos, los registros analizados son: b12vaciado603 y b13vaciado694, los demás se pueden encontrar en el Anexo E. Y consisten en:

- Una tabla que detalla los parámetros utilizados en la metodología como por ejemplo los parámetros utilizados en el cálculo, el tamaño de las ventanas de tiempo y los sensores que fueron empleados como inputs y outputs.
- Tres diagramas de estabilidad, los cuales se construyen al tomar los resultados de la identificación empleando DSI para una pequeña ventana de tiempo al principio, a la mitad y al final del registro, respectivamente, con el fin de visualizar la evolución de los parámetros dinámicos en el tiempo y verificar que parámetros como los criterios de similitud son adecuados para identificar las propiedades dinámicas en las ventanas consideradas.
- Una tabla donde se detallan las frecuencias iniciales de cada modo encontrado gracias al primer diagrama de estabilidad, cuyos valores son esenciales para generar las formas modales de la estructura y los gráficos comparativos de frecuencias, amortiguamientos y MAC.
- Formas modales a las que se les realiza el seguimiento a lo largo del tiempo.
- Tres gráficos que señalan: la variación de la frecuencia, razones de amortiguamiento y formas modales en el tiempo, respectivamente.
- Elaboración de un video que deja al descubierto el comportamiento que las formas modales de los modos 1 y 2 en el tiempo, respectivamente. Las cuales muestran un correcto desacople durante el transcurso del tiempo.

6.2.1.1. Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS694, altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$

Tabla 6.3. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, análisis de registro b12vaciado603.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1-A10 y A13
GDL o n'	80 y 79 (comparados)
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin (tamaño de ventana en número de datos)	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	278
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	103
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	290
#Ventana 3	238
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	560

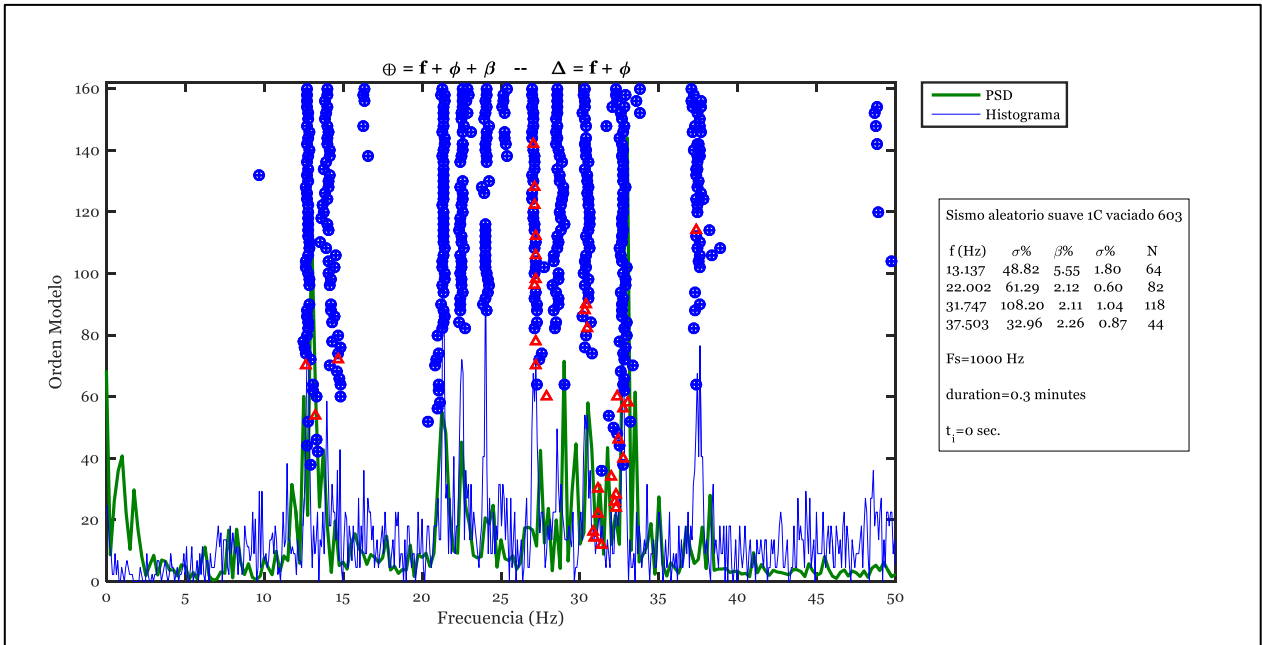


Figura 6.19. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

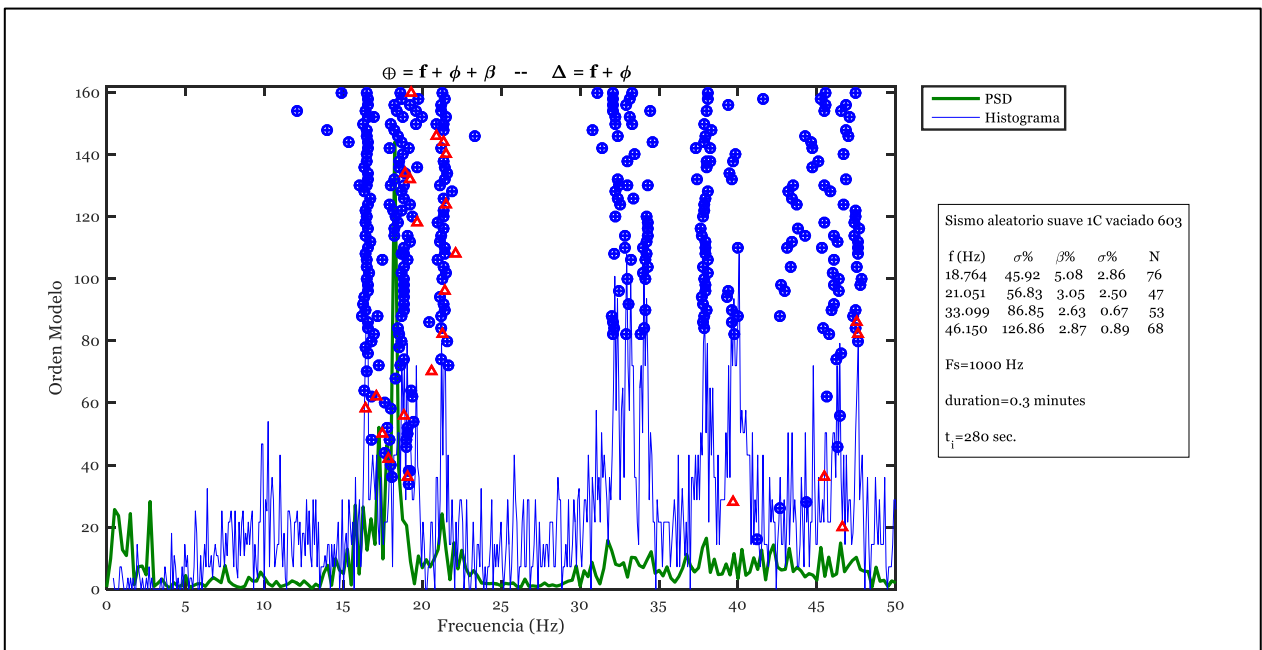


Figura 6.20. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

Analizando las dos primeras ventanas de diagramas de estabilidad, ver Figura 6.19 y Figura 6.20, es posible notar que los primeros 3 modos se notan claramente, siendo los dos primeros que varían en mayor medida producto del vaciado del estanque, además, a raíz de esto último, los modos que se encuentran entre 22 Hz y 30 Hz dejan de ser excitados, pierden energía y el método ya no es capaz de identificarlos. Por último en la Figura 6.21

sólo se identifican los dos primeros modos con más claridad dentro el contenido de energía en estudio.

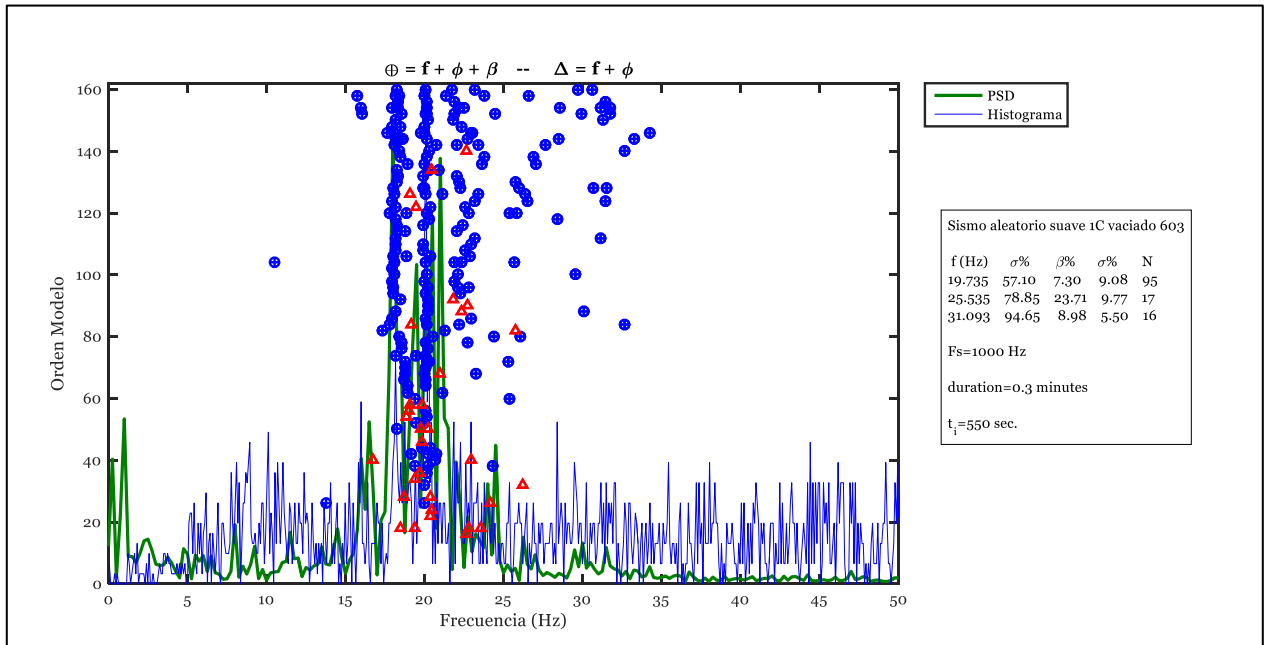


Figura 6.21. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

Tabla 6.4. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4	5	6
Frecuencia inicial (Hz)	12,78	13,90	21,42	24,09	27,02	30,36
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cff (%)	12	17	15	12	12	10
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cmac (%)	95	98	85	85	85	90
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre la ventana 1 y ventana i , cmacs (%)	94	87	85	85	85	90

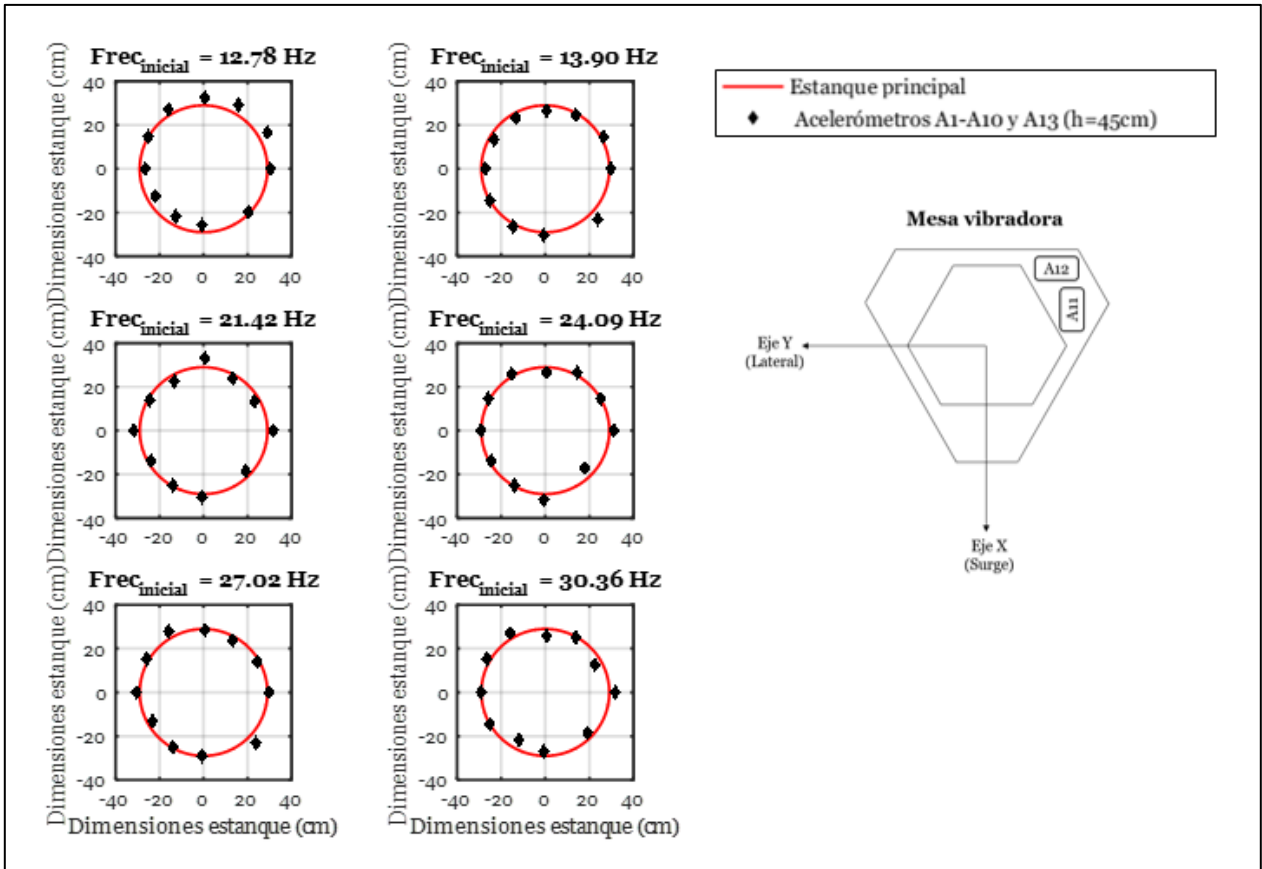


Figura 6.22. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

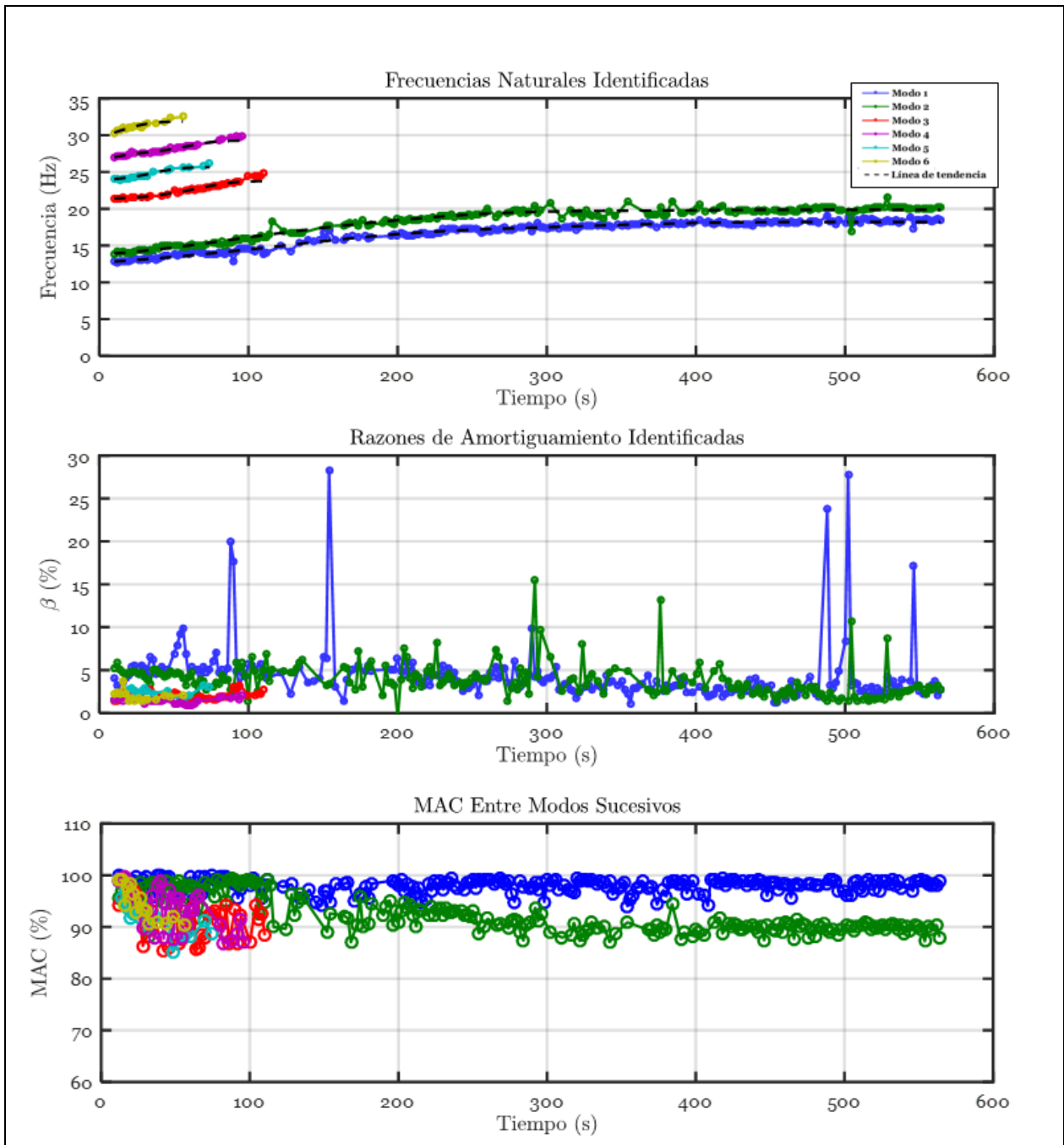


Figura 6.23. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

6.2.1.2. Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS696, altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$

Tabla 6.5. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, análisis de registro b13vaciado694.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y)
Acelerómetros outputs	A1-A10 y A13
GDL o n'	80 y 79 (comparados)
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin (tamaño de ventana en número de datos)	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	276
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	113
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	280
#Ventana 3	253
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	560

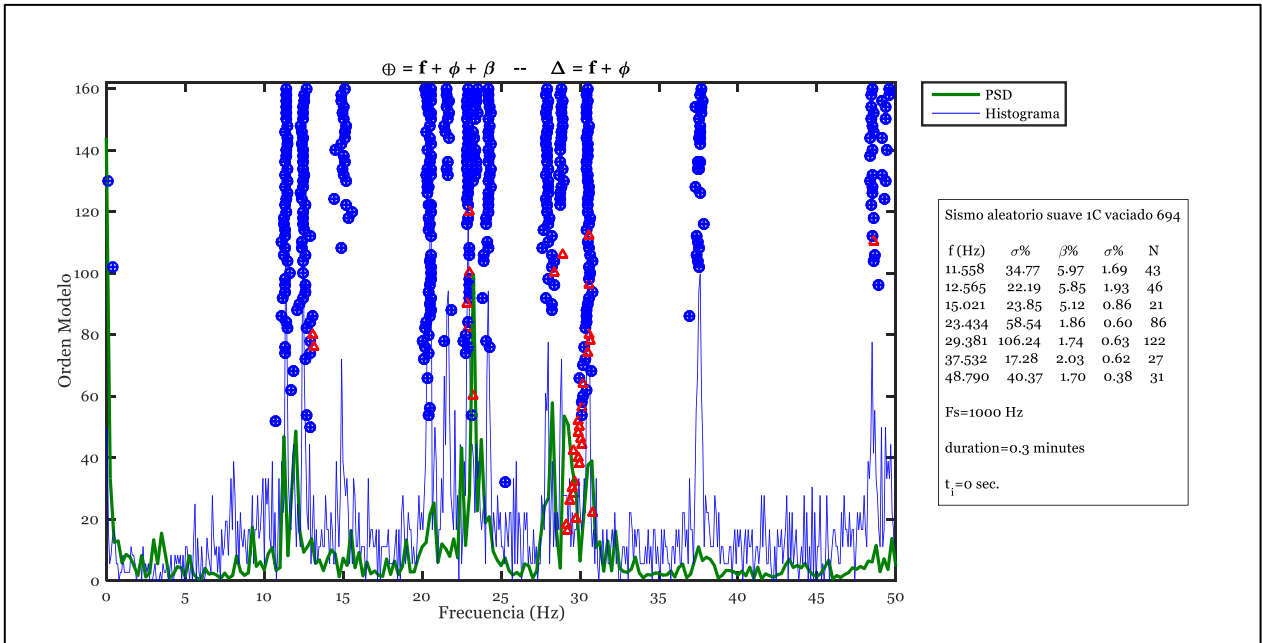


Figura 6.24. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4$ cm, registro b13vaciado694.

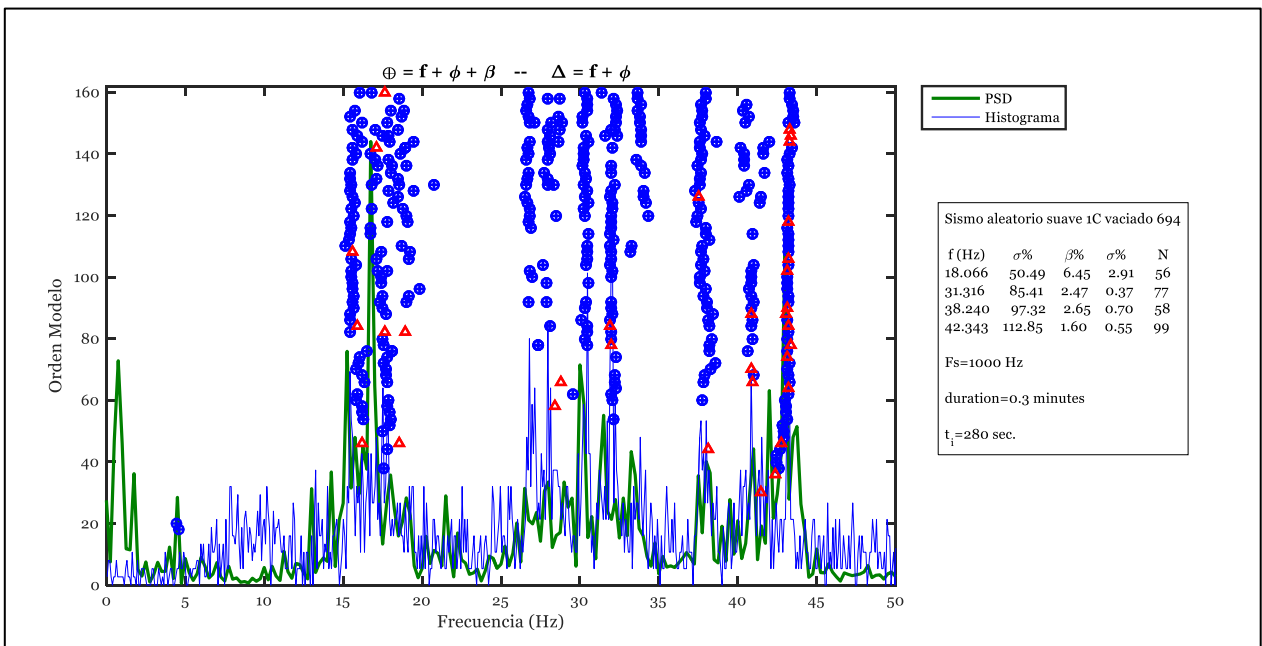


Figura 6.25. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4$ cm, registro b13vaciado694.

Análogo al caso anterior, estos dos primeros diagramas de estabilidad muestran que los modos entre 20 Hz y 30 Hz pierden energía y dejan de ser identificados o no se identifican con tanta claridad.

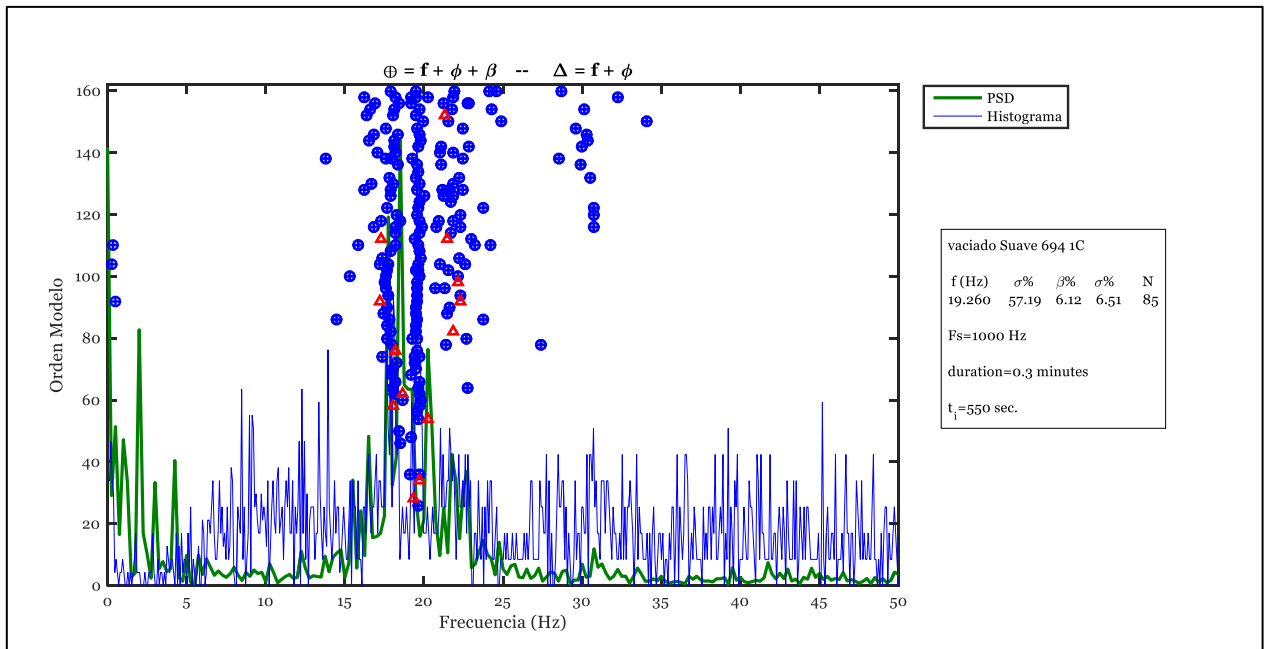


Figura 6.26. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.

Tabla 6.6. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.

Parámetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Frecuencia inicial (Hz)	11,36	12,55	20,55	22,92	24,20	30,39
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cff (%)	12	20	9	12	12	12
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cmac (%)	90	90	90	80	80	90
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre la ventana 1 y ventana i , cmacs (%)	90	90	90	80	80	90

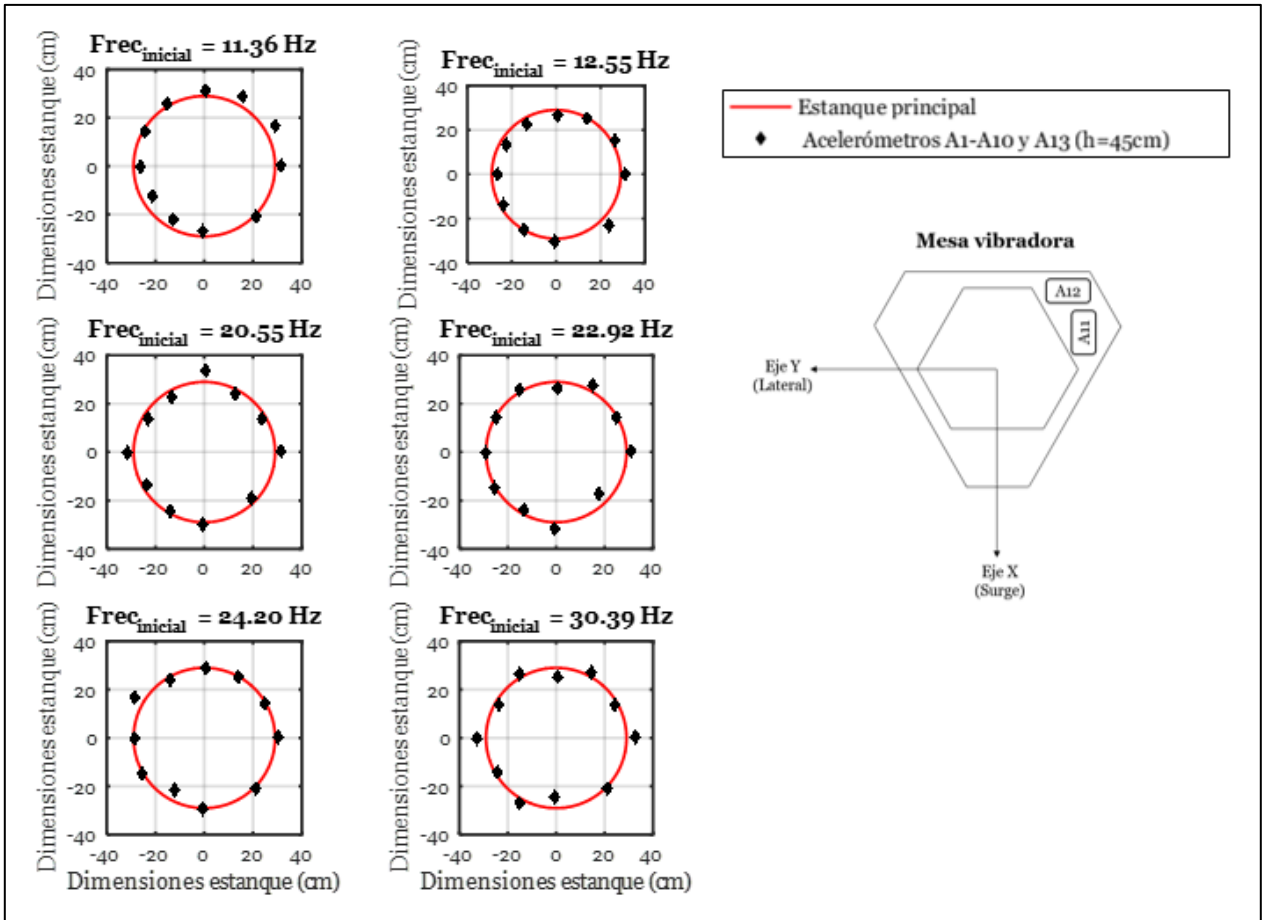


Figura 6.27. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.

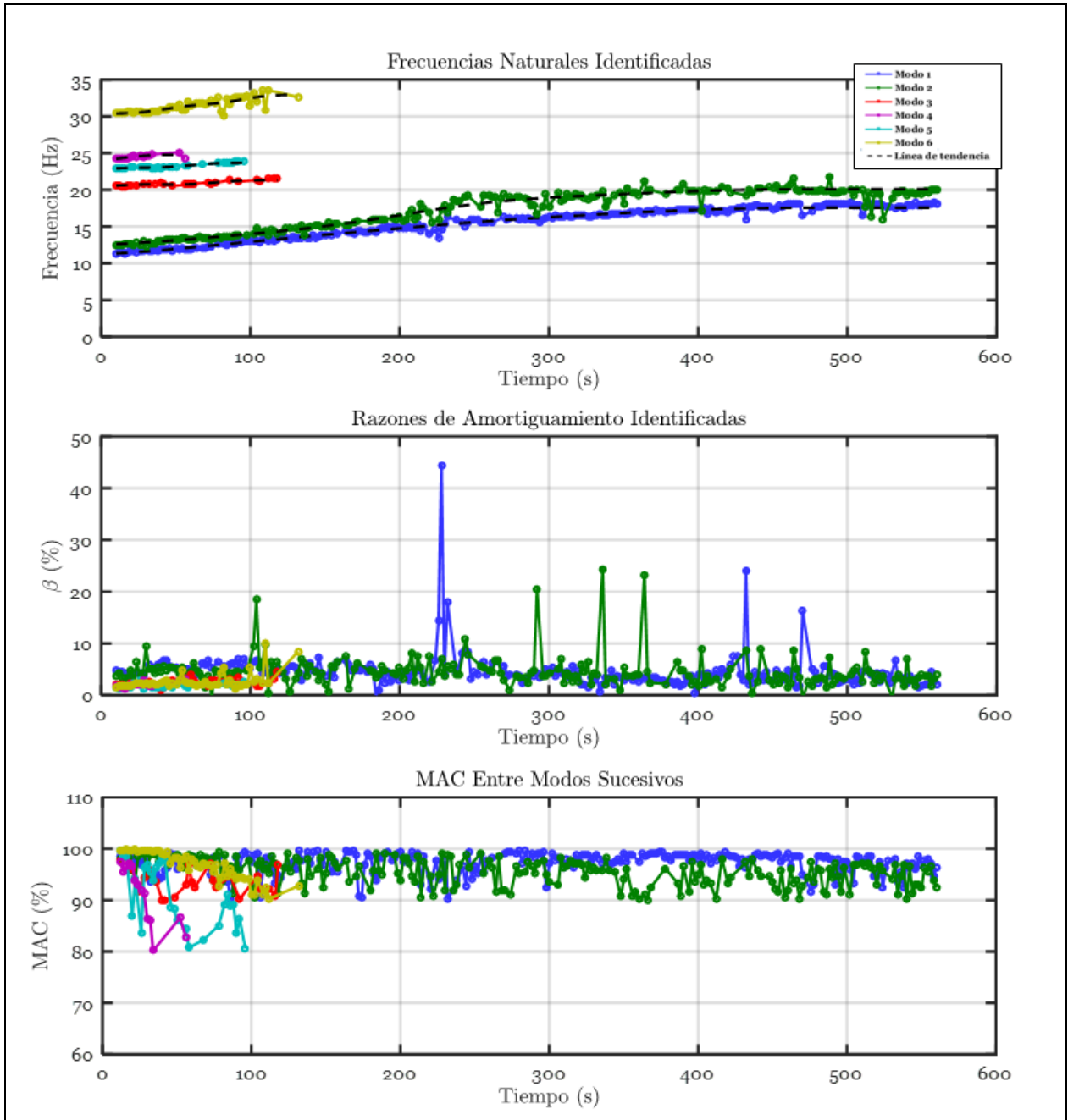


Figura 6.28. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.

6.2.2. Identificación de propiedades dinámicas para estanque con nivel de agua invariante en el tiempo

En esta sección se realiza un análisis considerando, en primera instancia, el método DSI con una única ventana de tiempo que abarca el registro completo de aceleraciones. Pero, debido a la alta no linealidad asociada al movimiento del agua y por tanto a la alta variación del amortiguamiento se obtuvieron resultados insatisfactorios, en los cuales no se identificaba con claridad las propiedades dinámicas del estanque. Por cuanto, se realizó el análisis con el método DSI por pequeñas ventanas de tiempo, análogo a 6.2.1 a pesar de que el nivel de agua se mantuvo invariante en el tiempo.

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a 2 registros procesados con el método: a01vacío000 y a09suave735, los demás se pueden encontrar en el Anexo E. Y consisten en:

- Una tabla que detalla los parámetros utilizados en la metodología como por ejemplo los parámetros utilizados en el cálculo, el tamaño de las ventanas de tiempo y los sensores que fueron empleados como inputs y outputs.
- Tres diagramas de estabilidad, los cuales se construyen al tomar los resultados de la identificación empleando DSI para una pequeña ventana de tiempo al principio, a la mitad y al final del registro, respectivamente, con el fin de visualizar la evolución de los parámetros dinámicos en el tiempo y verificar que parámetros como los criterios de similitud son adecuados para identificar las propiedades dinámicas en las ventanas consideradas.
- Una tabla donde se detallan las frecuencias iniciales de cada modo encontrado gracias al primer diagrama de estabilidad, cuyos valores son esenciales para generar las formas modales de la estructura y los gráficos comparativos de frecuencias, amortiguamientos y MAC.
- Formas modales a las que se les realiza el seguimiento a lo largo del tiempo.
- Tres gráficos que señalan: la variación de la frecuencia, razones de amortiguamiento y formas modales en el tiempo, respectivamente.

Elaboración de un video que deja al descubierto el comportamiento que las formas modales de los modos 1 y 2 en el tiempo, respectivamente. Las cuales muestran un correcto desacople durante el transcurso del tiempo.

6.2.2.1. Altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, excitación basal AS692

Tabla 6.7. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, análisis de registro a01vacio000.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7-A10
GDL o n'	80 y 79 (comparados)
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin (tamaño de ventana en número de datos)	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	281
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	116
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	280
#Ventana 3	256
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	560

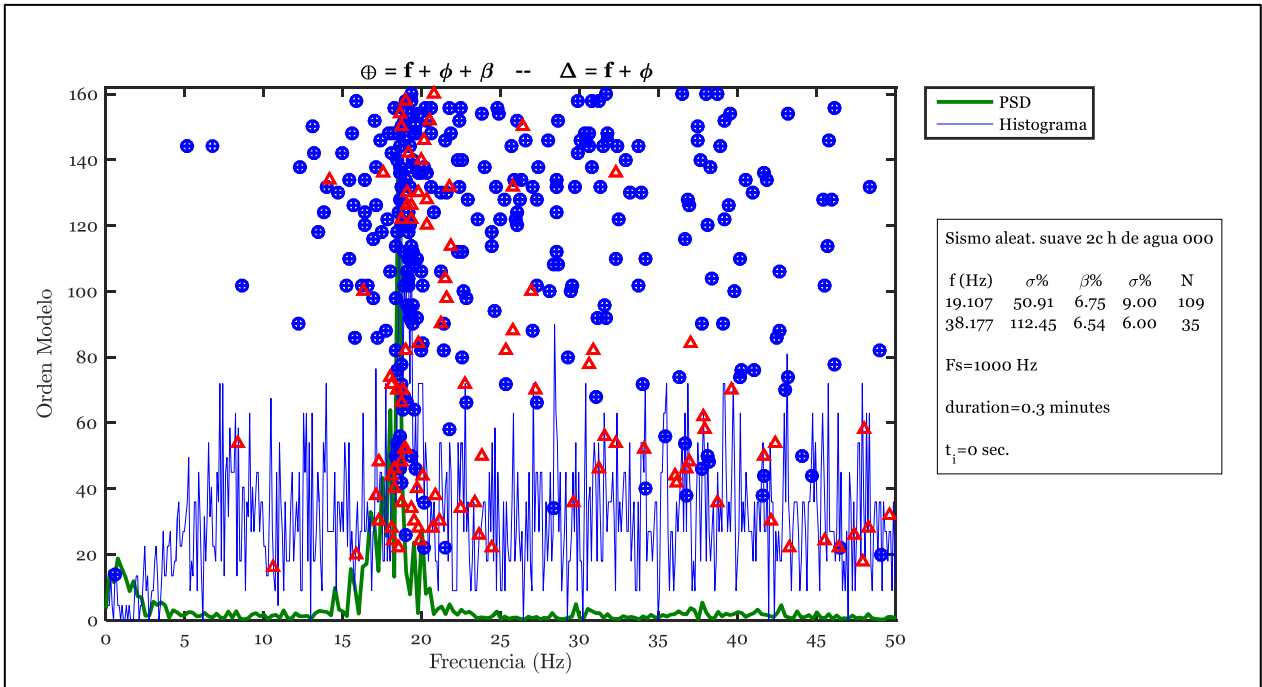


Figura 6.29. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

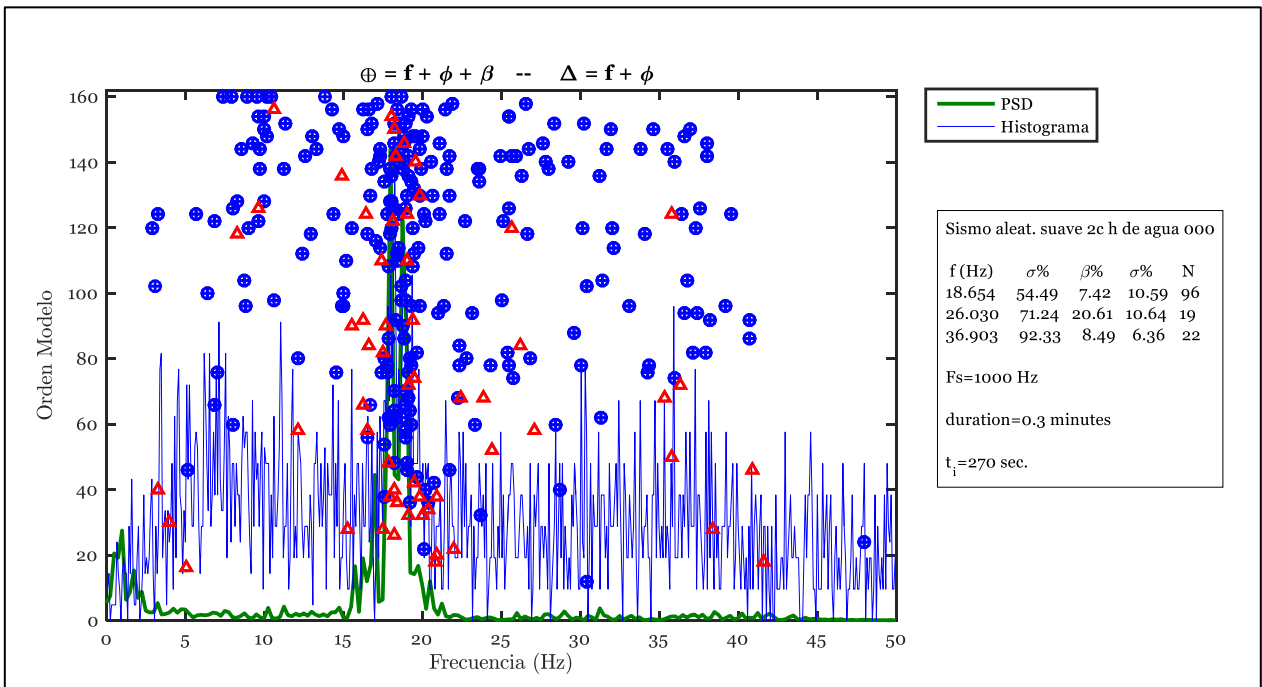


Figura 6.30. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

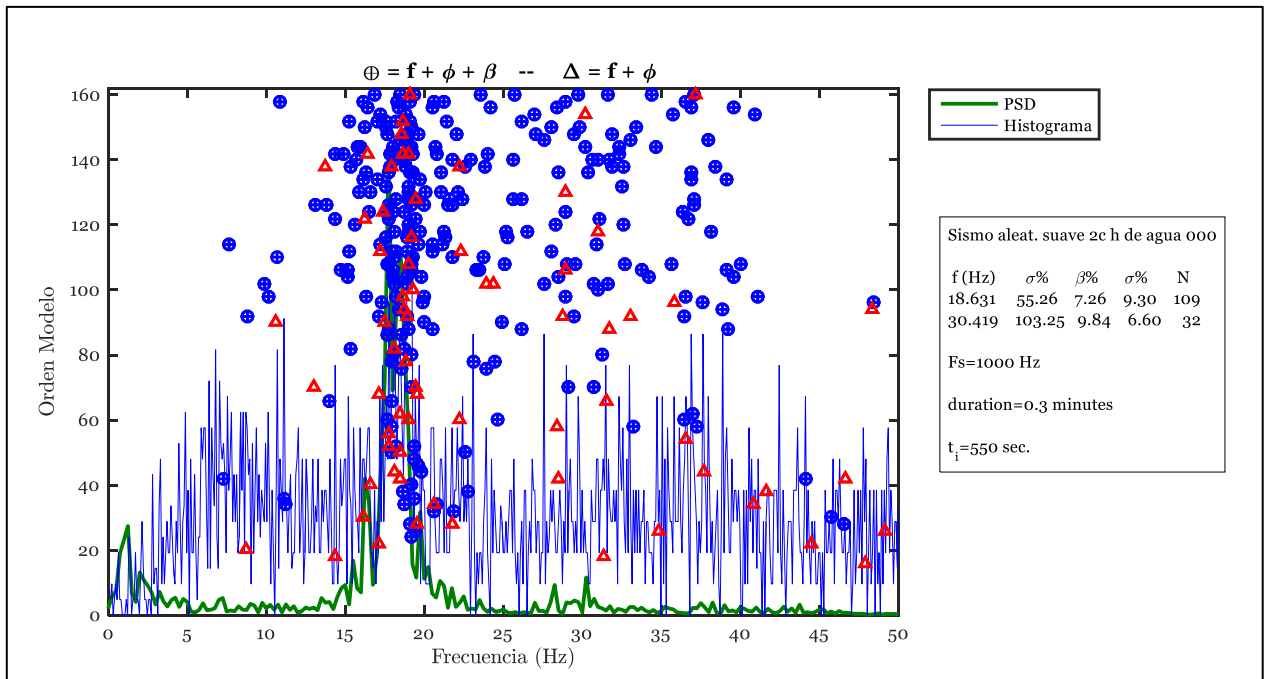


Figura 6.31. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

Tabla 6.8. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

Parámetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Frecuencia inicial (Hz)	18,62	19,06	N.I.	N.I.
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cff (%)	10,5	14	N.I.	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cmac (%)	92	90	N.I.	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre la ventana 1 y ventana i , cmacs (%)	90	90	90	90

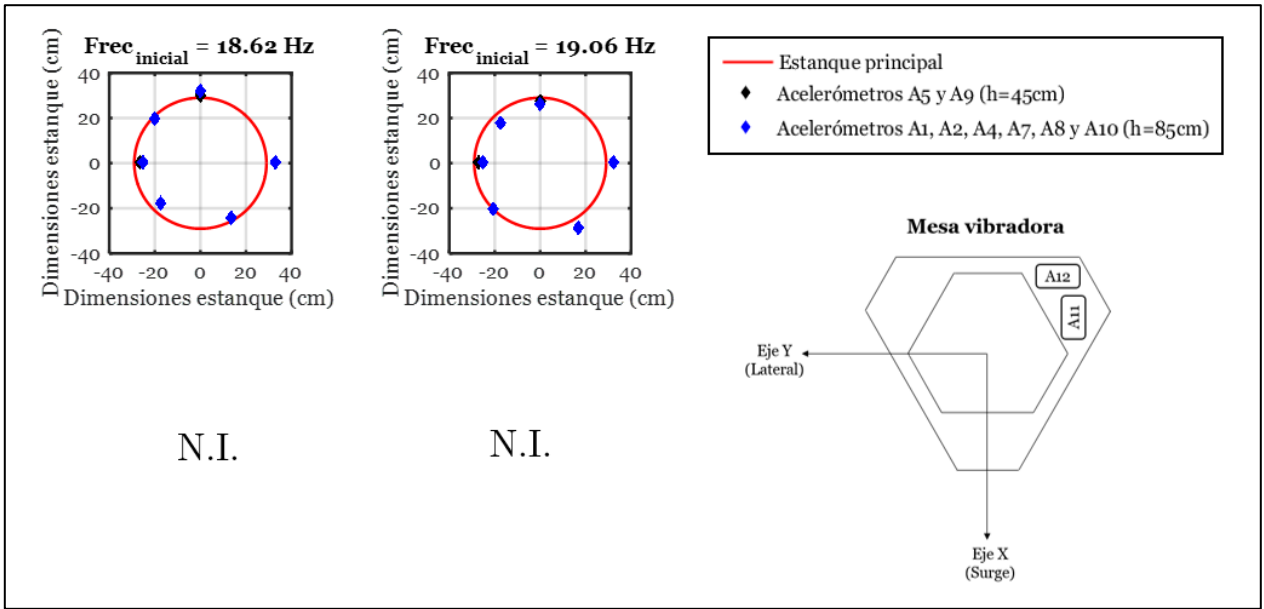


Figura 6.32. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

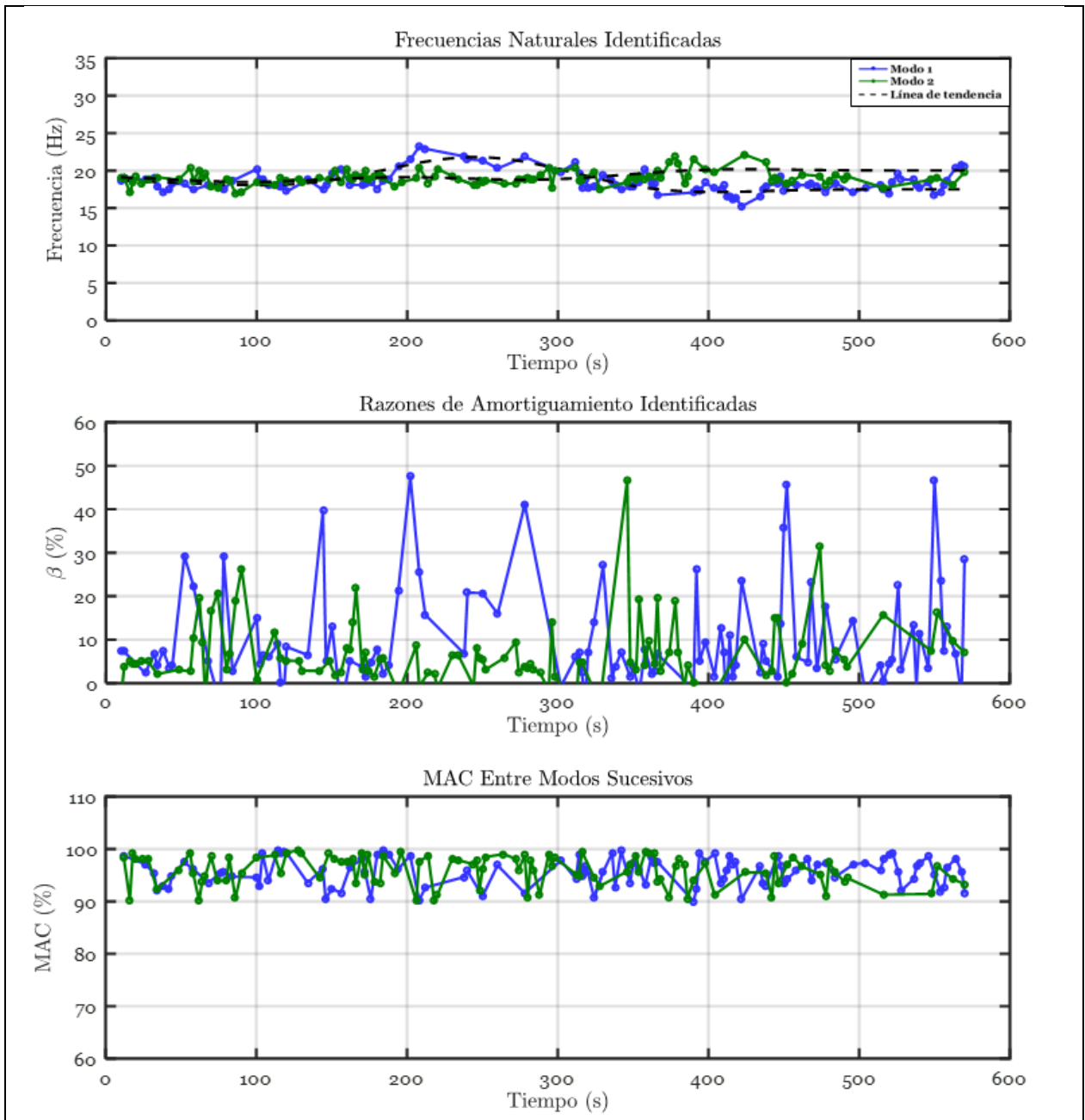


Figura 6.33. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

6.2.2.2. Altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, excitación basal AS692

Tabla 6.9. Parámetros usados para diagramas de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, análisis de registro a09suave735.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7-A10
GDL o n'	80 y 79 (comparados)
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin (tamaño de ventana en número de datos)	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	561
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	248
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	280
#Ventana 3	538
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	570

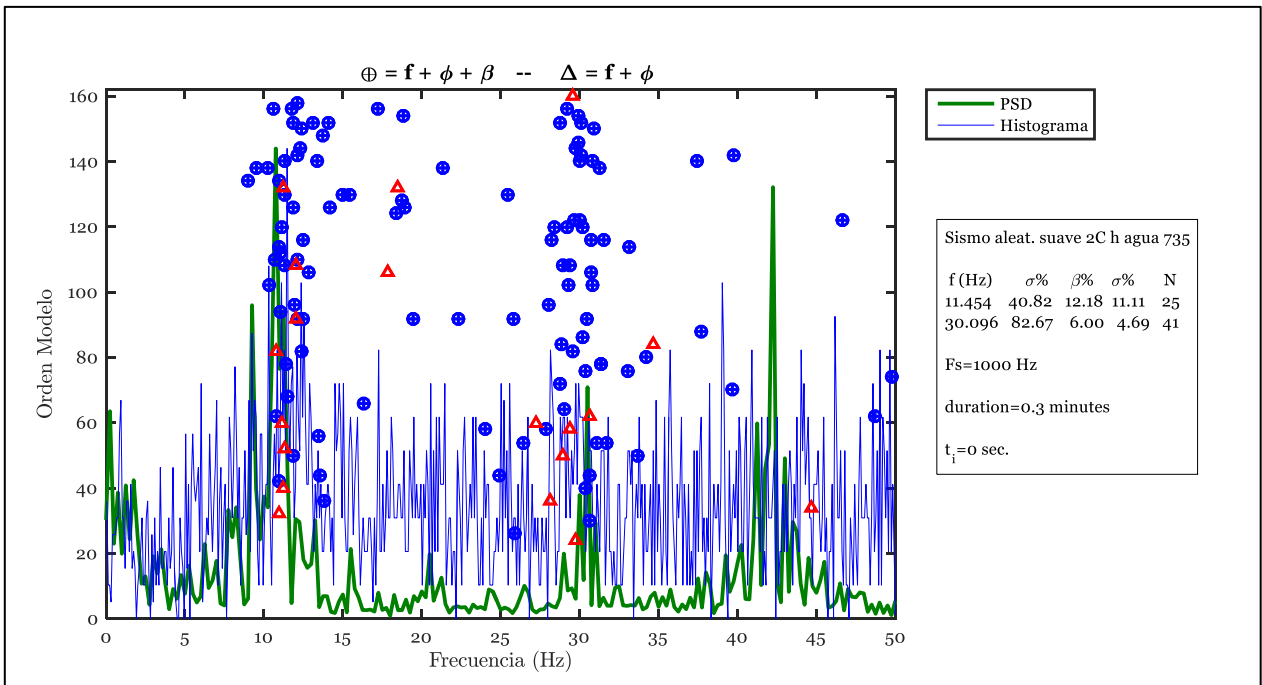


Figura 6.34. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

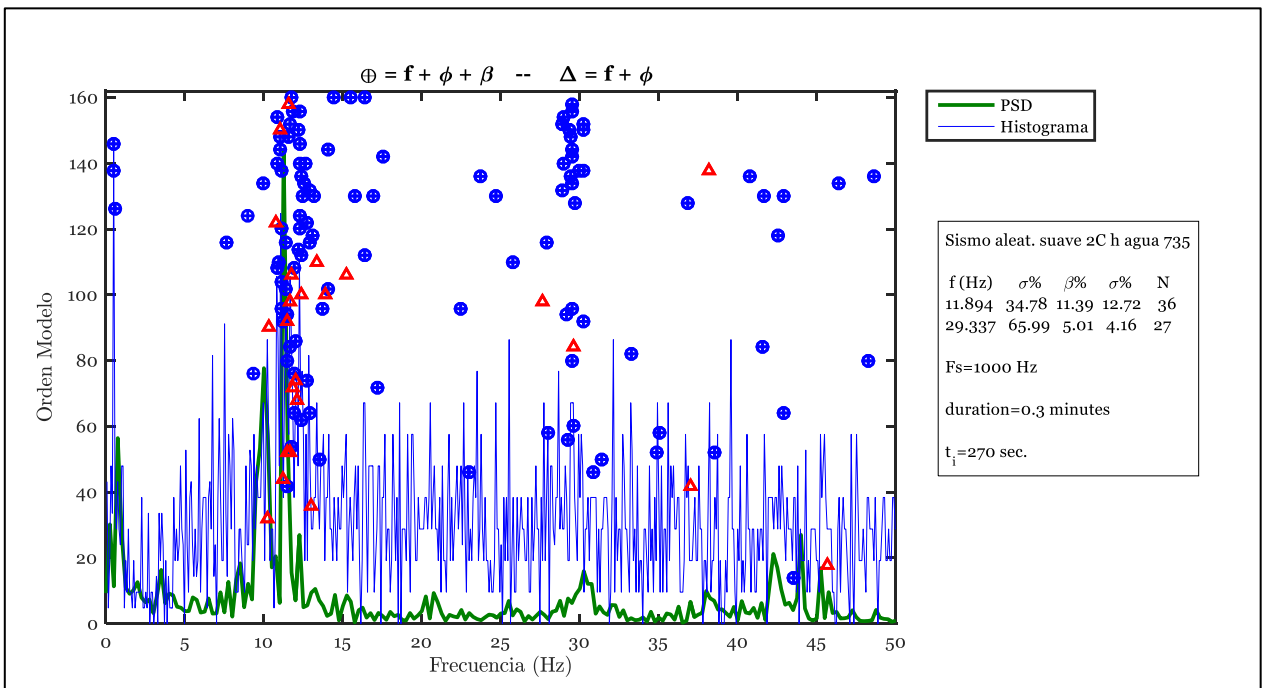


Figura 6.35. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

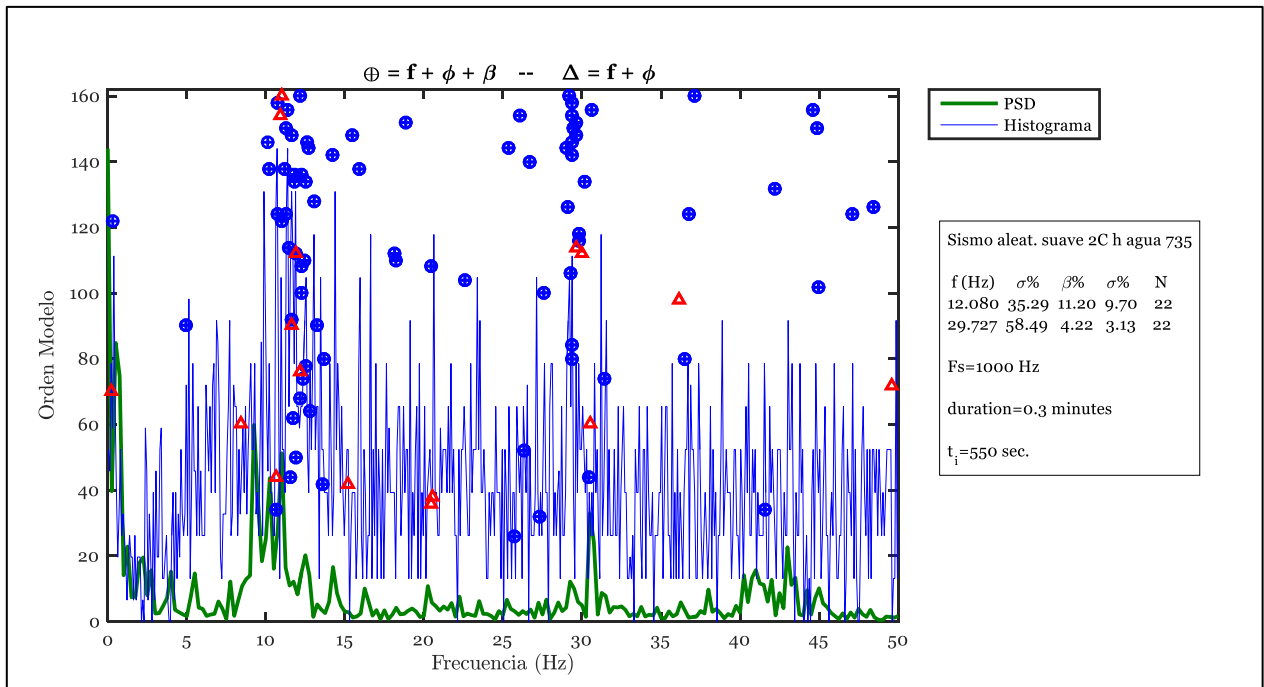


Figura 6.36. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

Tabla 6.10. Parámetros usados para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4	5	6
Frecuencia inicial (Hz)	10,84	14,67	N.I.	N.I.	N.I.	29,63
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cff (%)	10	10	N.I.	N.I.	N.I.	15
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre pequeñas ventanas consecutivas, cmac (%)	90	90	N.I.	N.I.	N.I.	85
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias entre la ventana 1 y ventana i , cmacs (%)	90	90	80	N.I.	N.I.	90

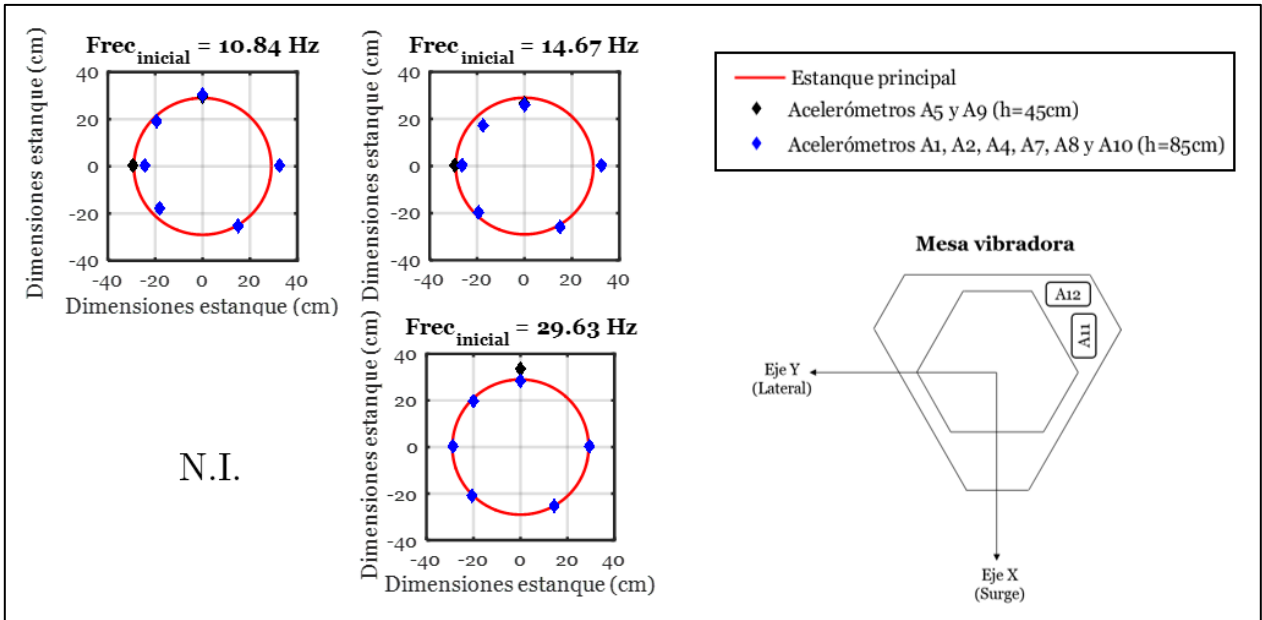


Figura 6.37. Formas modales identificadas al inicio del registro, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

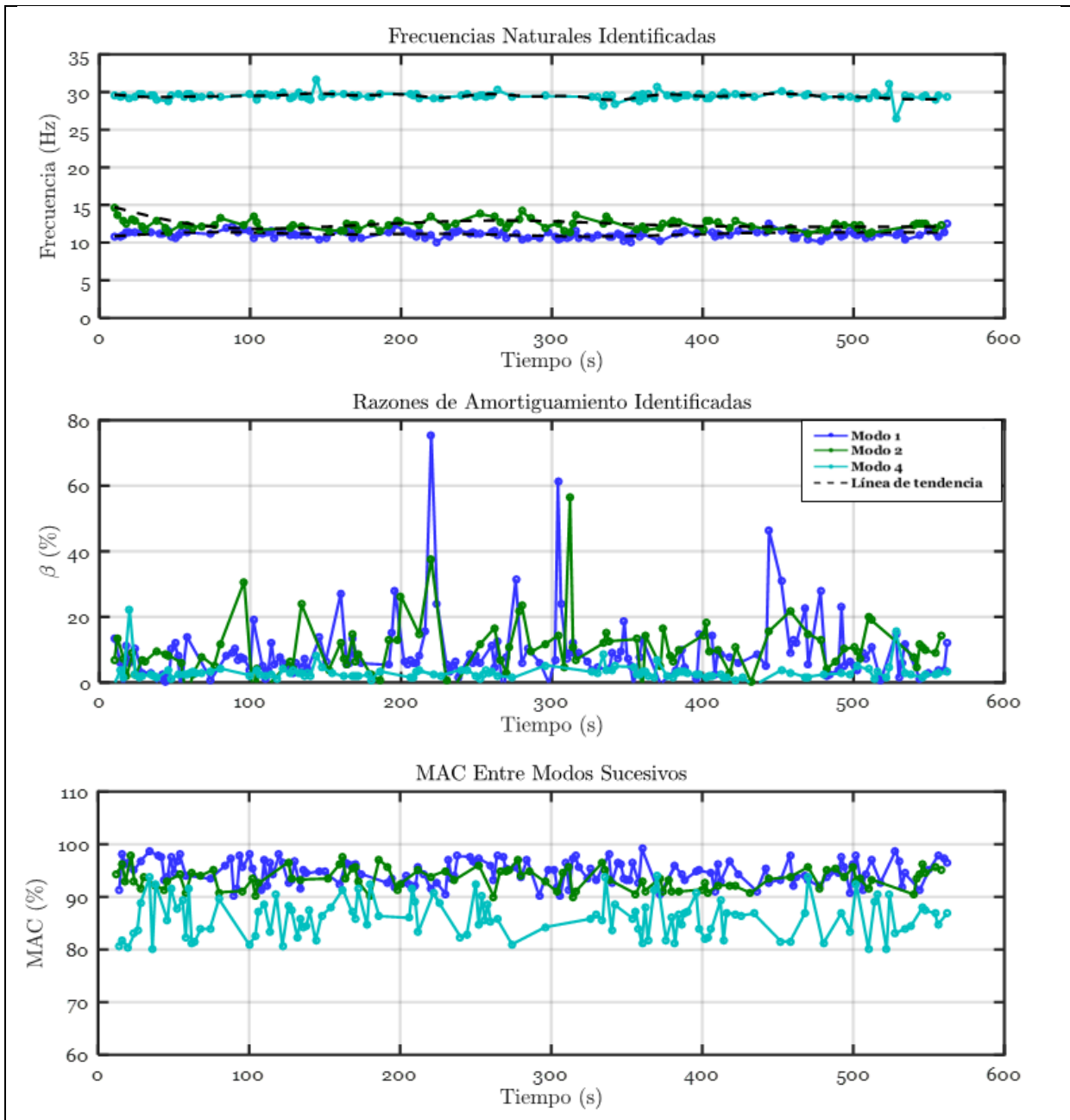


Figura 6.38. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

6.2.3. Resumen y análisis de resultados, método DSI

El método DSI, entrega el valor de las frecuencias, las razones de amortiguamiento y el MAC entre modos en el dominio del tiempo.

De los diagramas de estabilidad obtenidos para los registros que involucran vaciado de estanque, se aprecia que cuando el estanque no está suficientemente llenado se reduce significativamente la excitación en los modos de frecuencias altas (que se asocian a curvaturas en la parte central del estanque). Esto se atribuye al hecho que el oleaje al interior no excita a estos modos en forma significativa cuando el estanque está con un nivel de agua bajo.

Al igual que el método anterior, en DSI predomina el efecto de la masa impulsiva. Y se aprecian dos modos cercanos con frecuencias similares que varían entre 10 Hz y 20 Hz aproximadamente producto del vaciado del estanque.

Con respecto a las razones de amortiguamiento, se aprecia que existe una gran variación en su identificación lo que se atribuye a la interacción fluido-estructura y la estabilidad del método que se caracteriza por tener un comportamiento altamente no-lineal.

Las formas modales identificadas de los dos primeros modos fundamentales son perpendiculares y coincidente con los resultados obtenidos con ITD, comprobándose que aquella forma es propia de la estructura y que no necesariamente los golpes del ensayo de impacto provocan movimiento en aquella dirección.

Se presentan en la Tabla 6.11 el promedio de las frecuencias naturales identificadas (por cada registro que es procesado con DSI) a determinadas alturas de agua en su interior, desde los 73,1 cm hasta los 10,5 cm, rango donde se identifican con mayor claridad las propiedades dinámicas con este método. Dicha tabla se construye con el uso de los datos de la Tabla 9.2 del Anexo A y los datos de las tablas del Anexo E, asociadas al método DSI.

Tabla 6.11. Frecuencias de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
			Frecuencias (Hz)					
73,10	186,05	201,48	10,53	12,09	20,35	21,94	24,00	29,61
68,30	177	192,42	11,42	12,69	20,64	22,90	24,35	30,42
62,30	161,00	176,43	12,45	13,55	20,98	23,65	25,69	31,73
60,10	154,70	170,12	12,79	13,88	21,20	23,94	27,02	31,28
55,90	144,40	159,83	13,34	14,56	21,93	25,03	27,85	32,33
50,30	128,60	144,02	14,19	15,52	23,55	N.I.	29,67	35,19
46,00	118,50	133,93	14,84	16,72	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
40,50	103	118,42	15,93	17,72	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
33,80	86,40	101,83	16,54	18,82	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
31,50	79,45	94,87	16,95	19,26	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
23,00	57,75	73,18	17,58	19,44	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
20,20	49,50	64,92	17,68	19,85	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
13,70	33,75	49,18	18,15	19,92	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
10,50	24,40	39,83	18,26	19,85	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.

6.3. Métodos de identificación tiempo-frecuencia: Espectrograma y Función de Transferencia por pequeñas ventanas (tfTF)

Se presentan en gráficos de tonalidades, los espectrogramas y tfTF más representativos para cada eje de los principales registros de respuesta.

Los datos de los espectrogramas y tfTF se comparan con los de Ibrahim y DSI, con el fin de visualizar la consecuencia y/o diferencia entre los resultados de los métodos.

Observándose que los resultados obtenidos por ITD y DSI se asocian a partir de la Tabla 9.2 del Anexo A, la cual contiene asociado el tiempo que demora en vaciarse el estanque pasando por determinadas alturas de agua.

Con análisis tiempo-frecuencia tradicional se logra identificar la variación de la frecuencia en el tiempo cuando el estanque es vaciado en el tiempo. También, se identifica la energía constante cuando no es vaciado. Es por ello, que se presentan espectrogramas y función de transferencia para dos registros con niveles de altura de agua variables en el tiempo y dos con altura constante.

Una observación directa de los resultados es que las frecuencias predominantes observadas con espectrograma o con tfTF son muy cercanas con las obtenidas en ITD y DSI, principalmente cuando el estanque presenta más de la mitad de su capacidad con agua.

Se puede observar que los análisis tiempo-frecuencia se observan sólo en algunos sectores del gráfico de tonalidades, sin superponer ITD y DSI, la existencia de dos modos muy cercanos, pero en general de estas representaciones no se puede inferir la existencia de dos modos predominantes de frecuencias cercanas.

6.3.1. Nivel de altura de agua variable

Los siguientes gráficos de tonalidades (Espectrograma y tfTF) muestran la variación de la energía identificada en el espacio tiempo-frecuencia cuando el estanque es vaciado y sometido a excitaciones basales, lo que se traduce en conocer la variación de la frecuencia a lo largo del tiempo, que varía entre los 10 Hz a los 20 Hz aprox. Además, se muestra la superposición de los resultados obtenidos con ITD y DSI.

Como ejemplo se muestran los resultados para dos casos en particular, registros b12vaciado603 y b13vaciado694. Los resultados del procesamiento de otros registros de respuesta se presentan en el en Anexo E.

6.3.1.1. Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS694, altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$

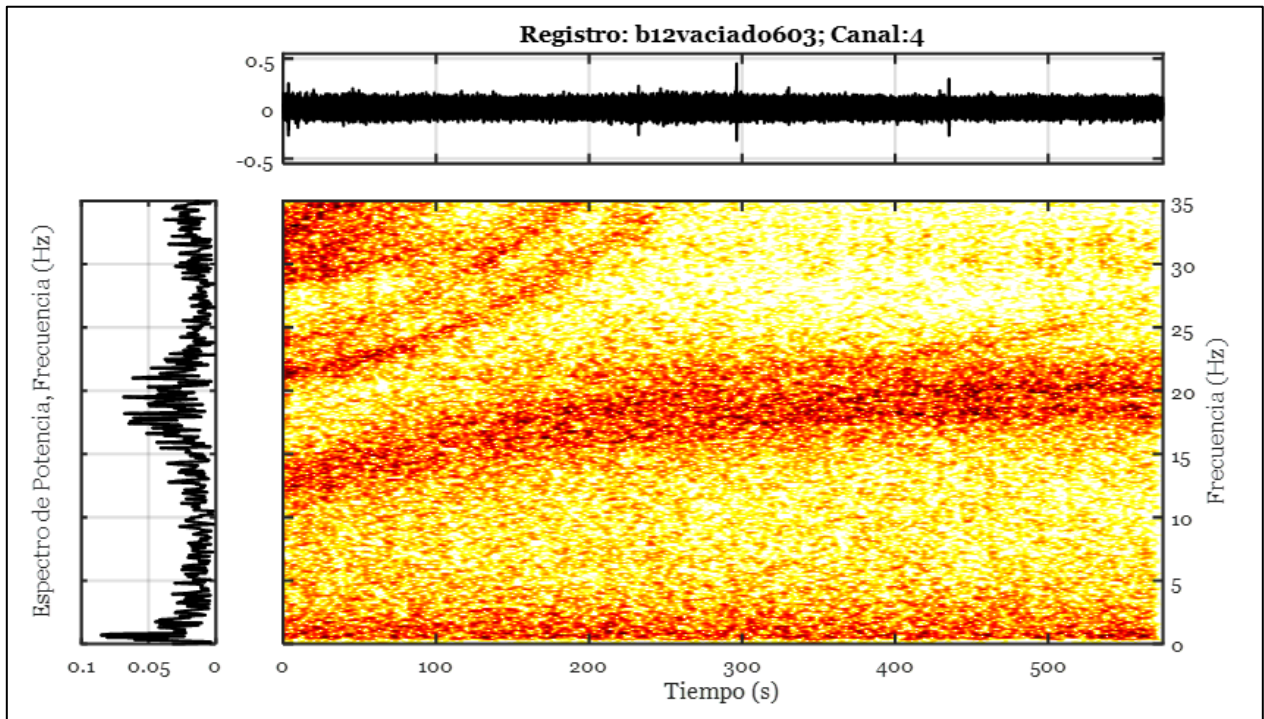


Figura 6.39. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A4, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

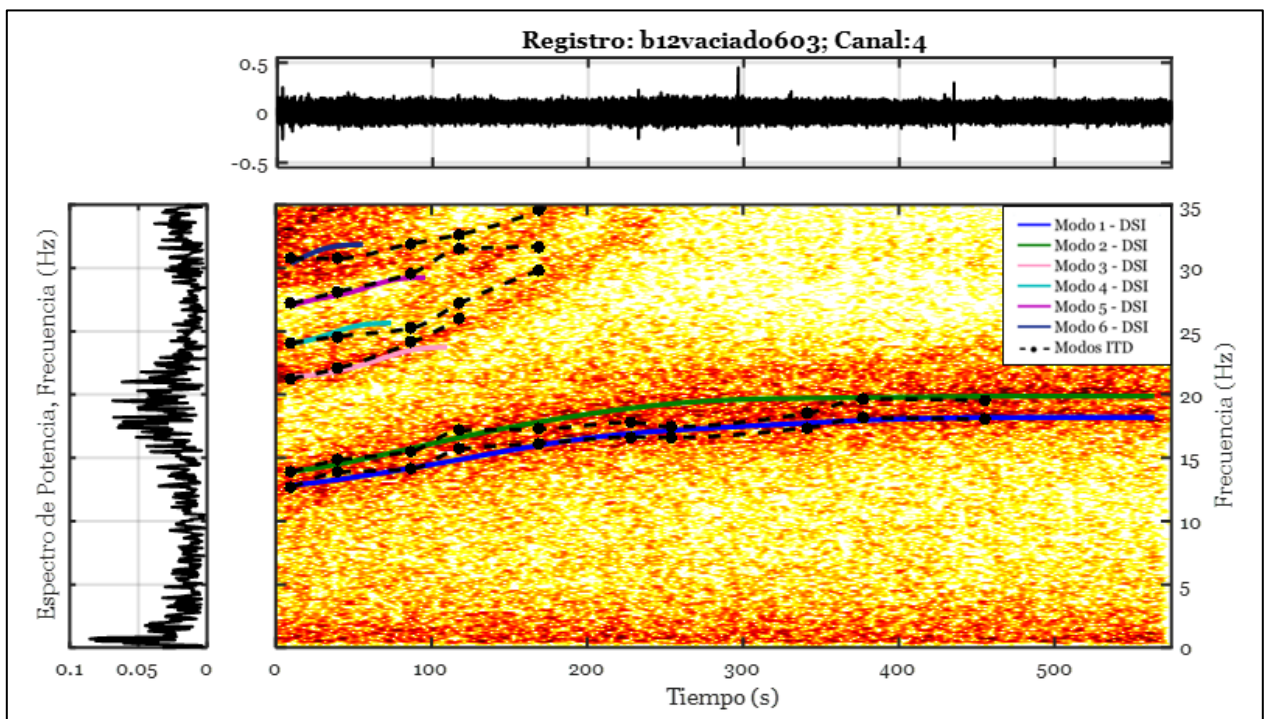


Figura 6.40. Superposición de los métodos Espectrograma, ITD y DSI. Excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

Al aplicar la función de transferencia por pequeñas ventanas de tiempo, tTF, se limpia el registro en bajas frecuencias, mostrándose con mayor énfasis la energía de los modos excitados.

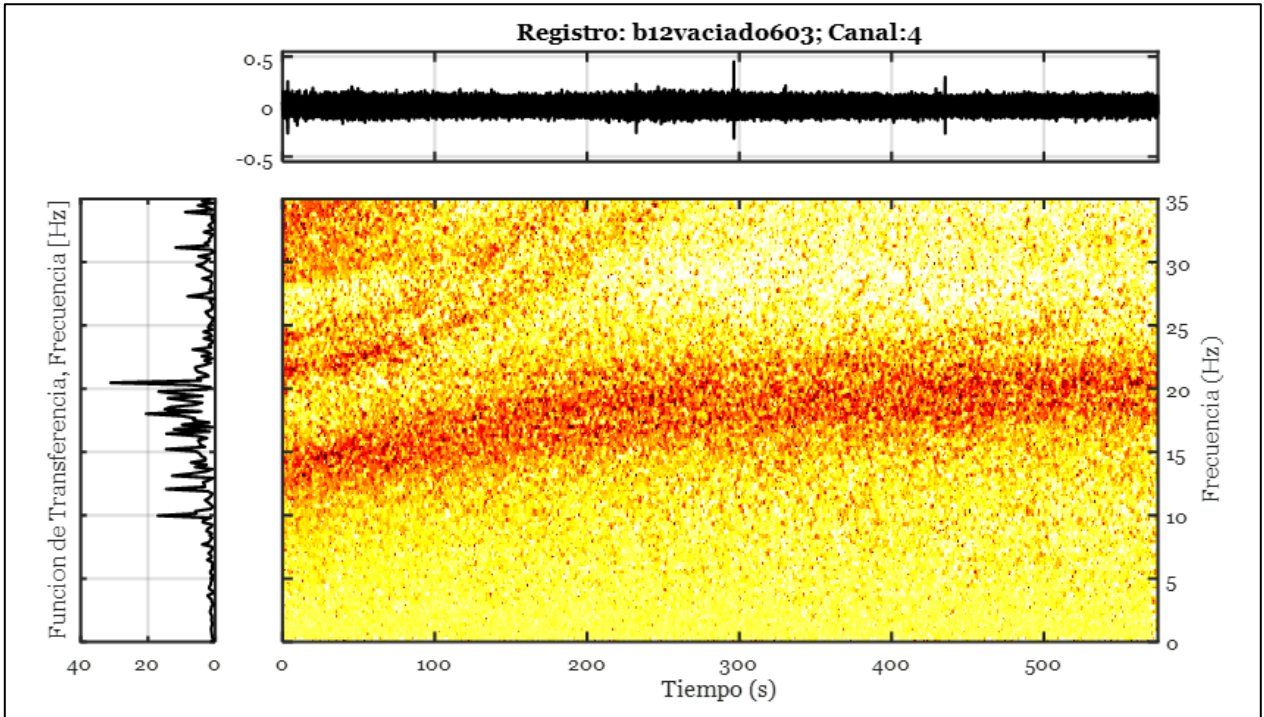


Figura 6.41. tTF, análisis en la dirección eje X, output A4 e input A12, excitación basal AS694, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,3 \text{ cm}$, registro b12vaciado603.

6.3.1.2. Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS696, altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$

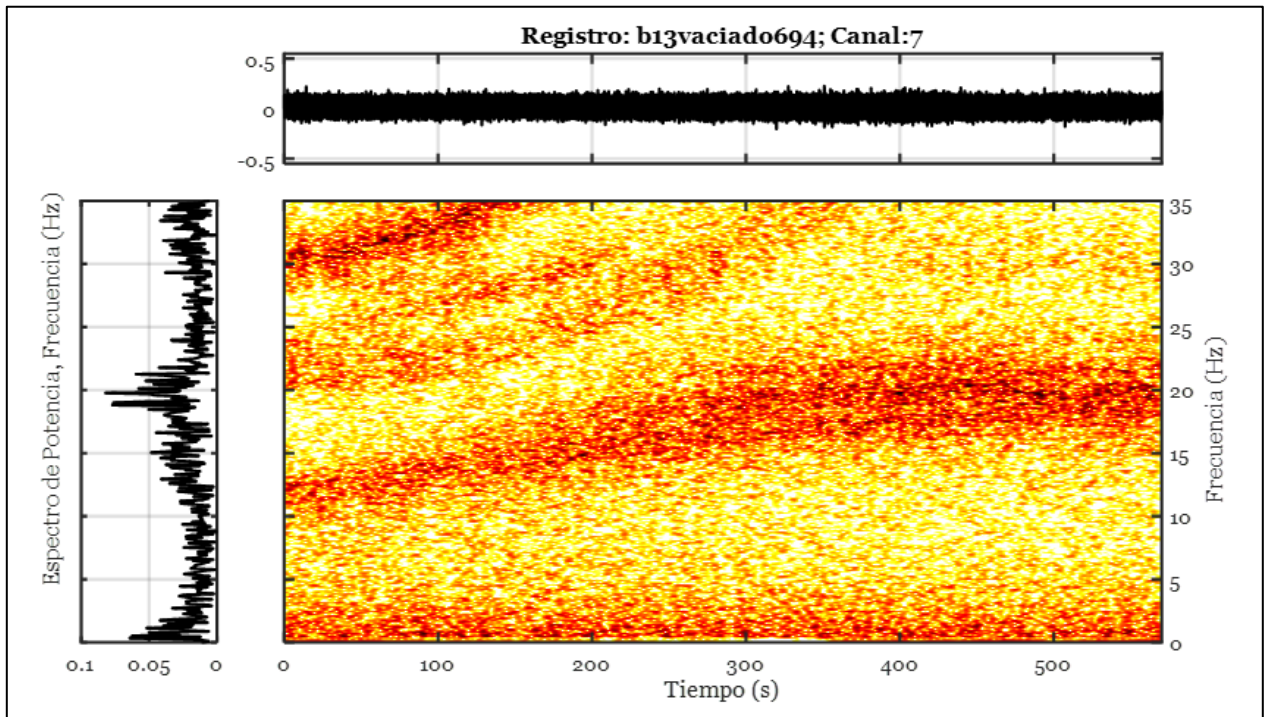


Figura 6.42. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A7, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.

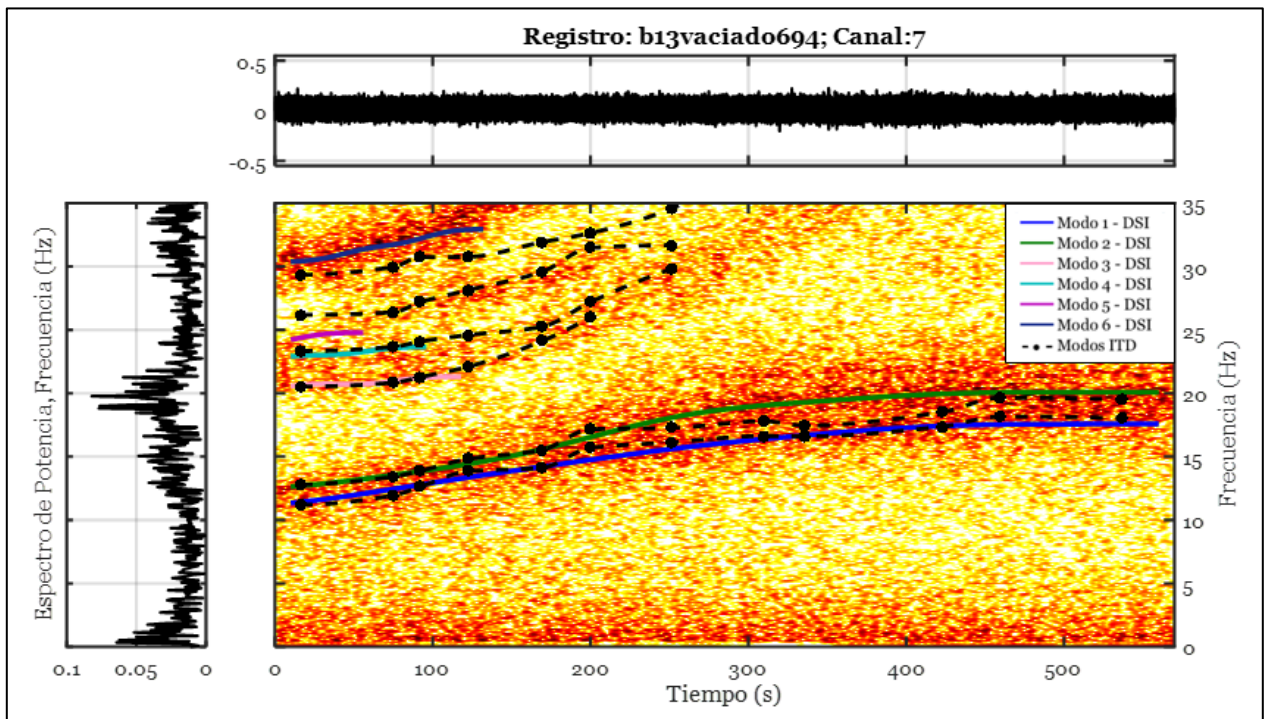


Figura 6.43. Superposición de los métodos Espectrograma, ITD y DSI. Excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.

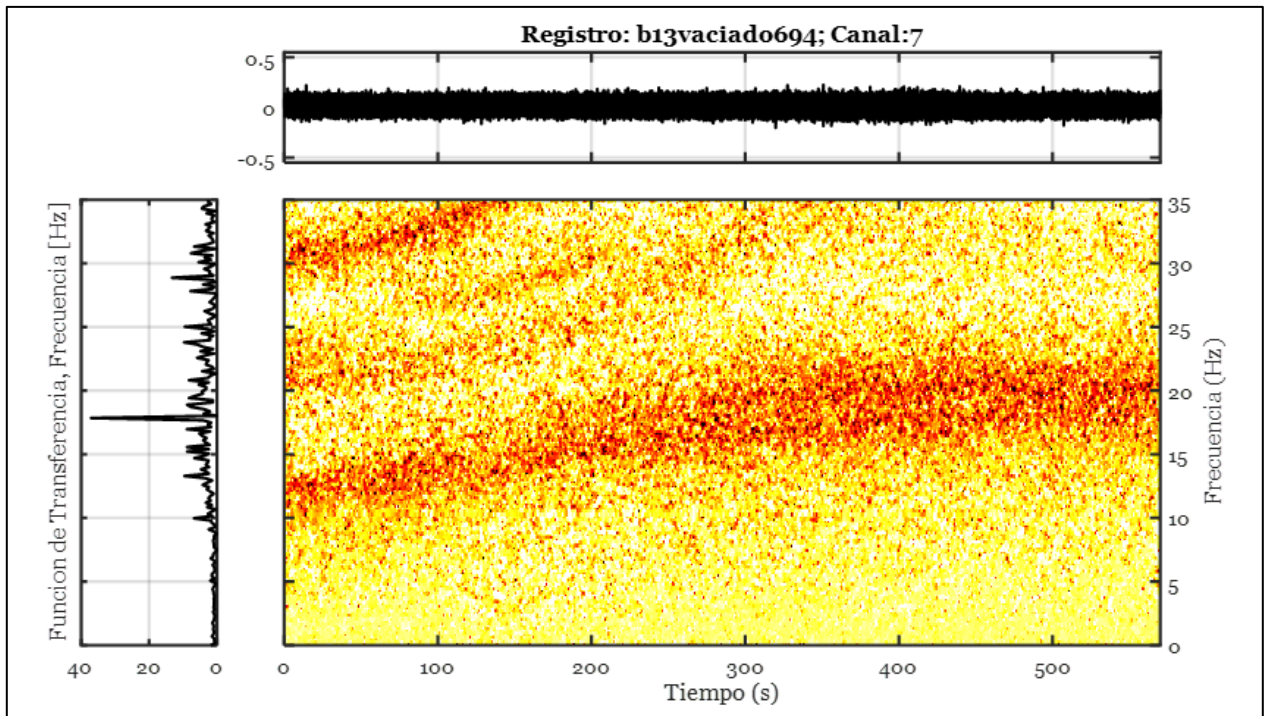


Figura 6.44. tfTF, análisis en la dirección eje Y, output A7 e input A11, excitación basal AS696, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 69,4 \text{ cm}$, registro b13vaciado694.

6.3.2. Nivel de altura de agua constante

Análogo al caso anterior los gráficos de tonalidades (Espectrograma y tfTF) muestran la energía identificada en el espacio tiempo-frecuencia, a diferencia que ahora el estanque contiene nivel de agua constante y es sometido a excitaciones basales, lo que se traduce en conocer la frecuencia de la estructura que es constante en el tiempo para cada modo identificado.

Como ejemplo se muestran los resultados para dos casos en particular, registros a01vacio000 y a09suave735, es decir, cuando el estanque está vacío y cuando contiene agua al 86% de su capacidad.

Los resultados del primer registro, ver Figura 6.45 y Figura 6.46, se observa energía sólo en el primer (y quizás segundo) modo a los 18 Hz aprox., en cambio, en el segundo registro, ver Figura 6.47 y Figura 6.48, se observa alta energía a varios niveles de frecuencia, aquello indica varios modos fundamentales de la estructura que logran identificarse gracias al aumento de masa al interior del estanque. Los dos primeros modos de la estructura están entre los 10,5 Hz y 13 Hz aprox., y el tercero cerca de los 22 Hz. Notar que la frecuencia natural de los primeros modos disminuyó en comparación con lo que se identificó en el primer registro debido a este aumento de masa, haciéndose menos rígida la estructura.

6.3.2.1. Altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, excitación basal AS692

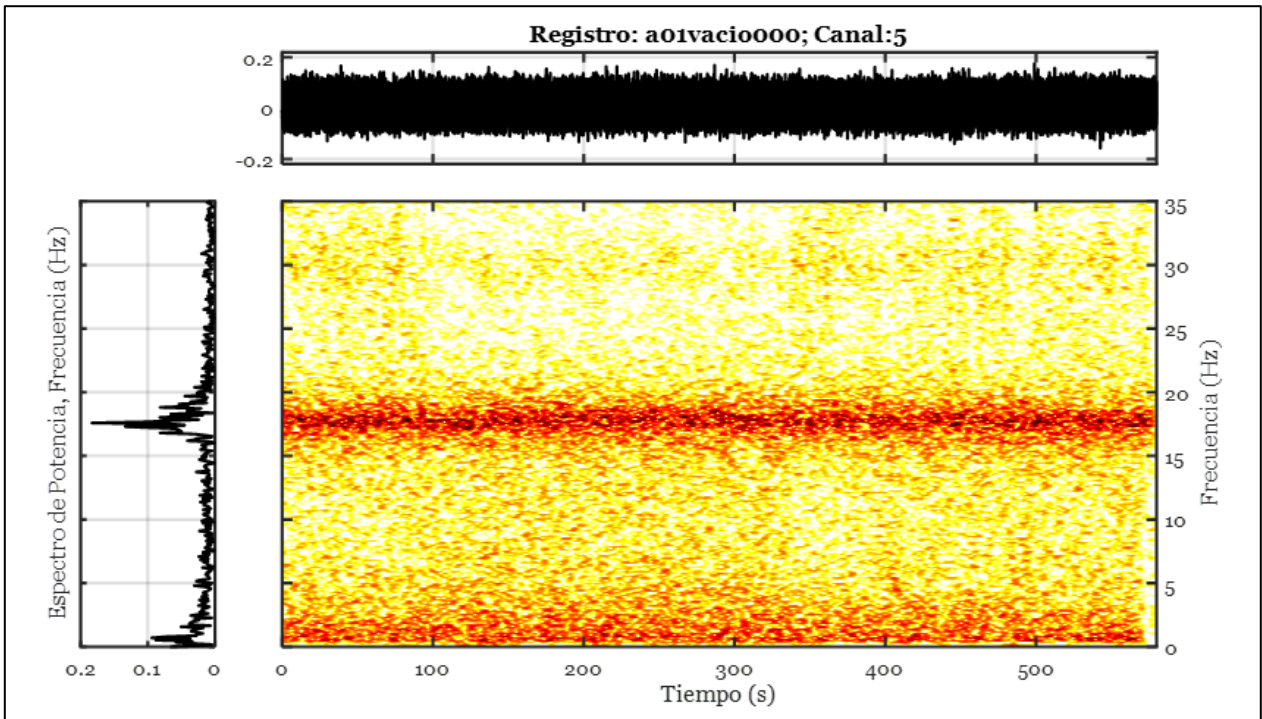


Figura 6.45. Espectrograma, output A5, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

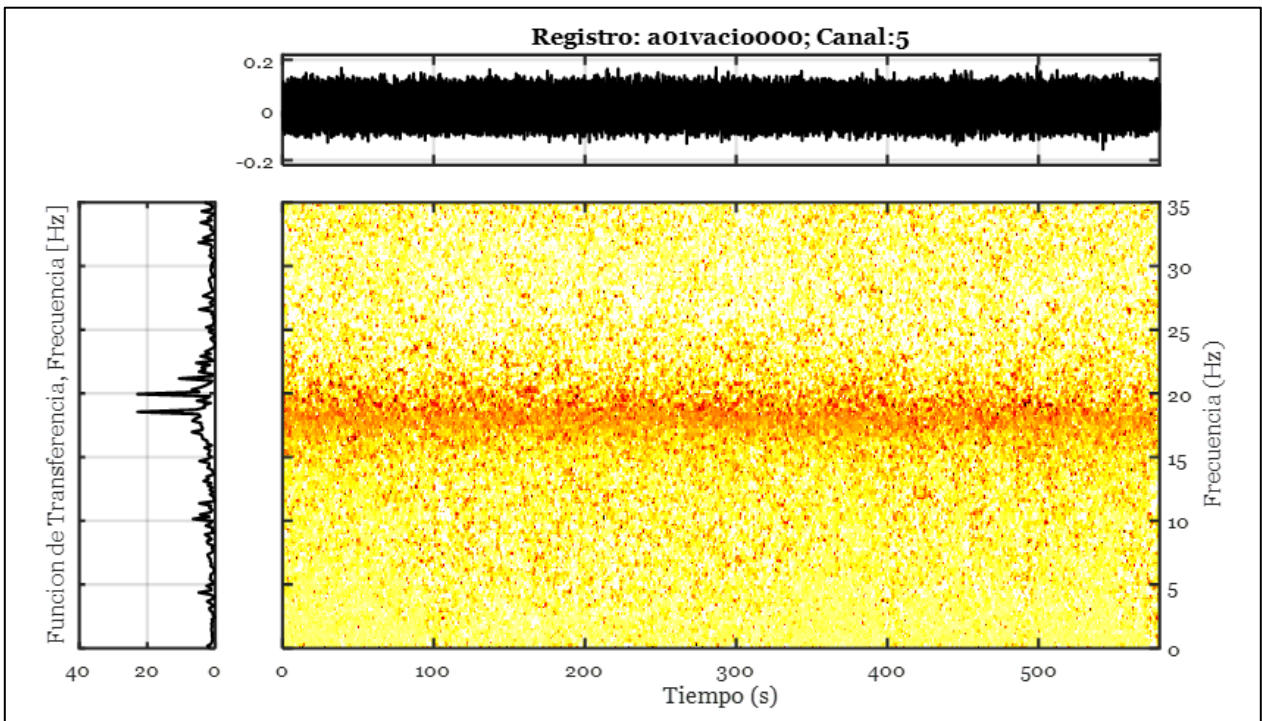


Figura 6.46. tTF, output A5 e input A6, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, registro a01vacio000.

6.3.2.2. Altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, excitación basal AS692

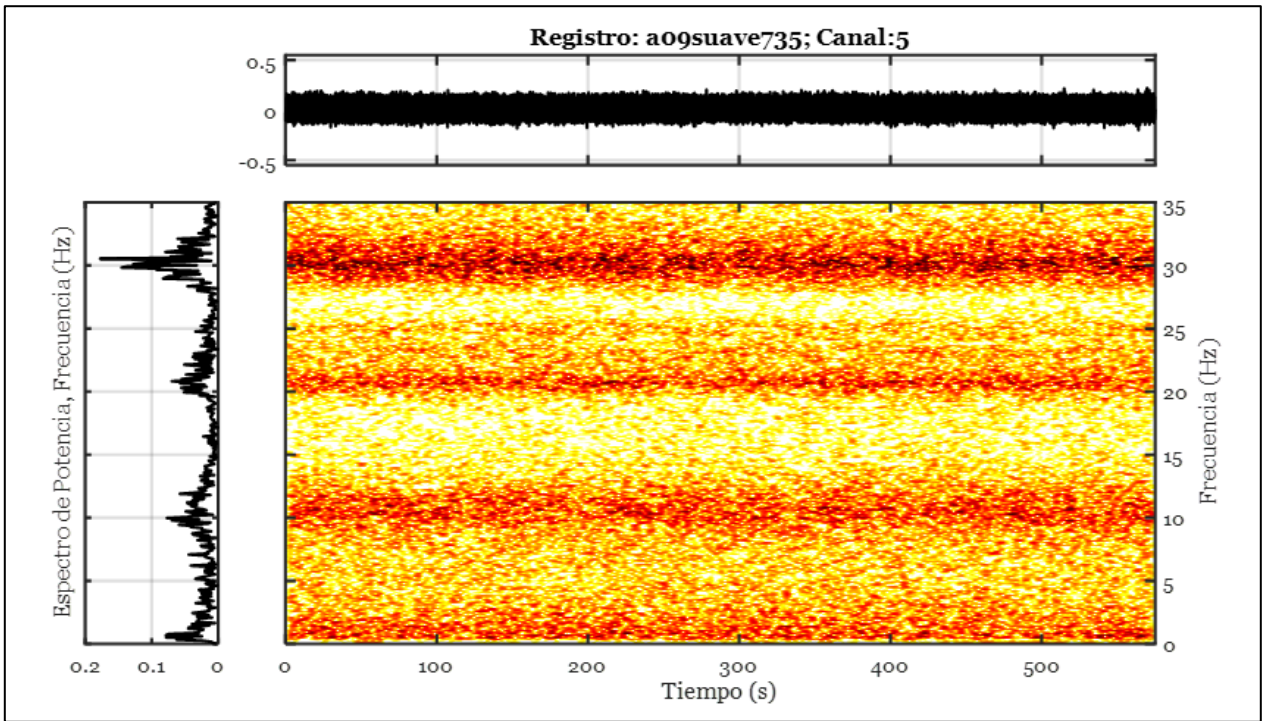


Figura 6.47. Espectrograma, output A5, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

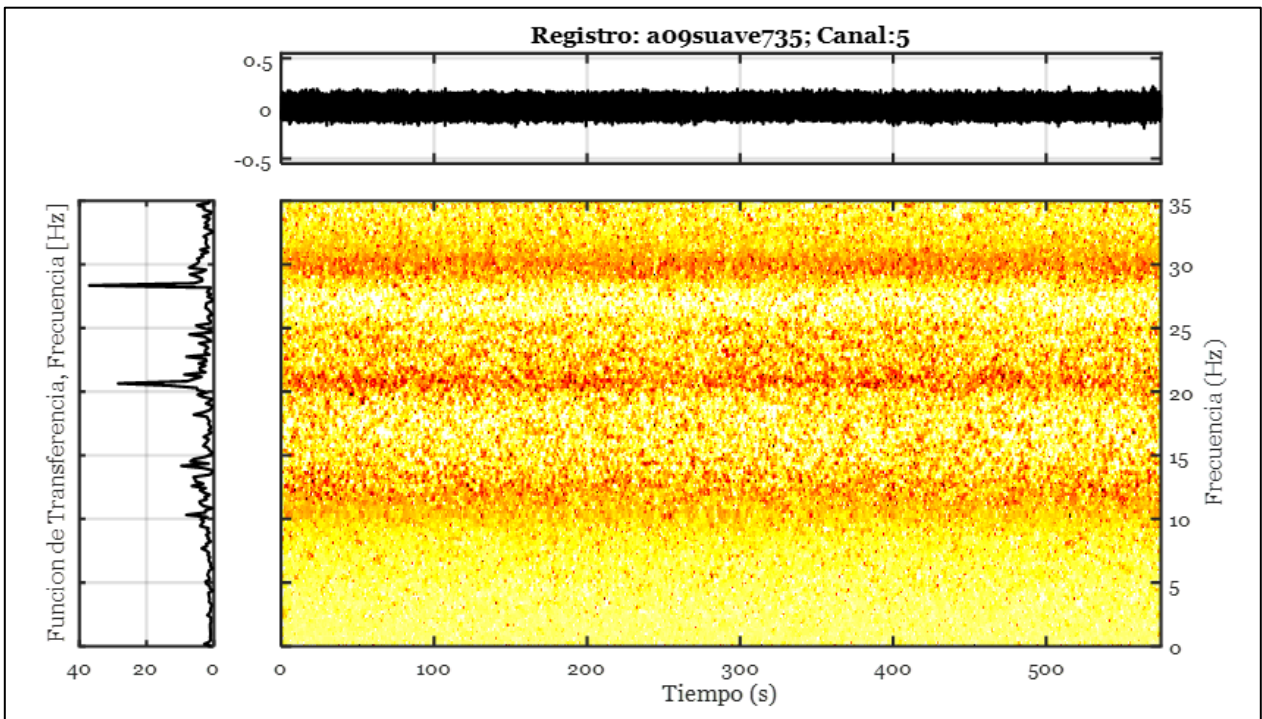


Figura 6.48. tFfF, output A5 e input A6, excitación basal AS692, altura de agua constante $h = 73,5 \text{ cm}$, registro a09suave735.

6.4. Método de identificación a través de la descomposición en el dominio de la frecuencia para el caso con excitación basal (SMFDD)

Se aplica el método SMFDD por pequeñas ventanas a los registros de respuesta de aceleraciones obtenidos en los ensayos dinámico con vaciado de estanque en el tiempo.

Los resultados que se muestran a continuación corresponden al procesamiento de datos de 2 registros de respuestas de aceleraciones con el método SMFDD: a12vaciado731 y a21vaciado623. Sus resultados consisten en:

- Gráficos de los valores singulares asociados a cada input por pequeñas ventanas: $|V_s \omega|$ v/s Frecuencia (ω). Se muestra la primera ventana, una del sector central del registro y la última ventana.
- Gráficos de la descomposición modal para cada input por pequeñas ventanas. Se muestran las ventanas correspondientes a los gráficos de los valores singulares.
- Gráficos del espectro de potencia y formas modales asociado a cada modo j -ésimo identificado debido a una acción del tipo ruido blanco en la entrada i -ésima.

Gracias a los métodos modales de identificación anteriores es que se tiene una aproximación del ángulo y dirección de los dos primeros modos fundamentales de la estructura. Aquella información es utilizada de manera que los inputs considerados como entradas son obtenidos en las direcciones de los modos principales, lo cual se realiza proyectando las entradas medidas (en ejes X y Y) en dos direcciones perpendiculares orientados en un ángulo de 41,2 grados coincidentes a los primeros dos modos de vibrar del estanque (Figura 6.15 y Figura 6.16). De esta forma, el input 1 (proyectado) excitará fundamentalmente al primer modo transversal, mientras que el segundo input (proyectado) excitará fundamentalmente al segundo modo transversal.

Cabe mencionar que las formas modales identificada con este método, son presentadas respetando siempre la orientación original de la mesa vibradora.

A modo de resumen, se establece la Tabla 6.14 donde están señaladas las frecuencias en función de la altura del agua al interior del estanque.

6.4.1. Nivel de altura de agua variable

6.4.1.1. Vaciado de estanque sometido a excitación basal AS692, altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$

Tabla 6.12. Parámetros necesarios para la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Rotación de inputs	-41°
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
Frecuencia de resamplado (Hz)	500
Duración de la ventana de tiempo (s)	40
Traslapo (Tiempo entre ventanas)	2%
Cantidad de ventanas	275

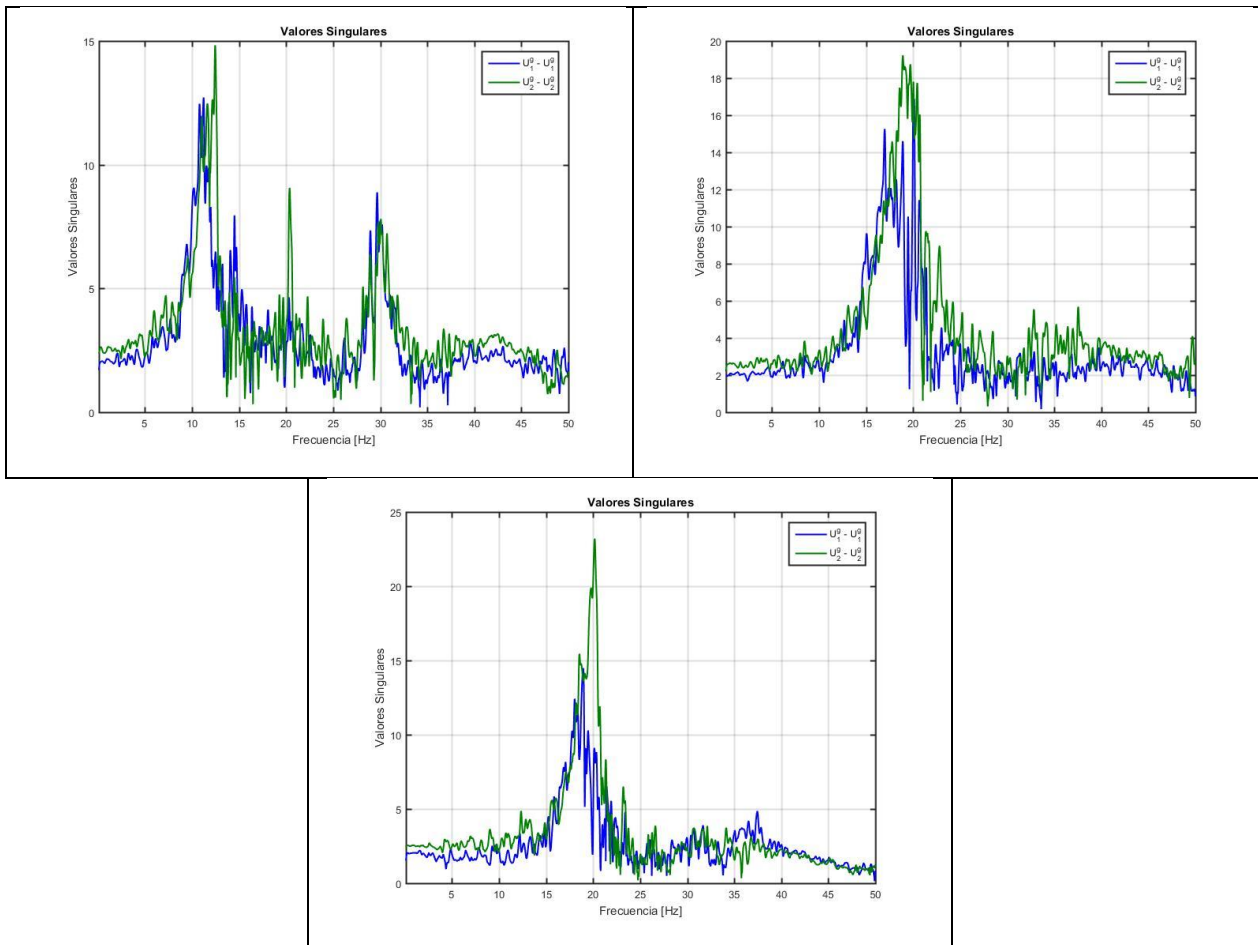


Figura 6.49. Valores singulares por pequeñas ventanas asociados a cada input. Ventanas #1, #150, #275, respectivamente. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

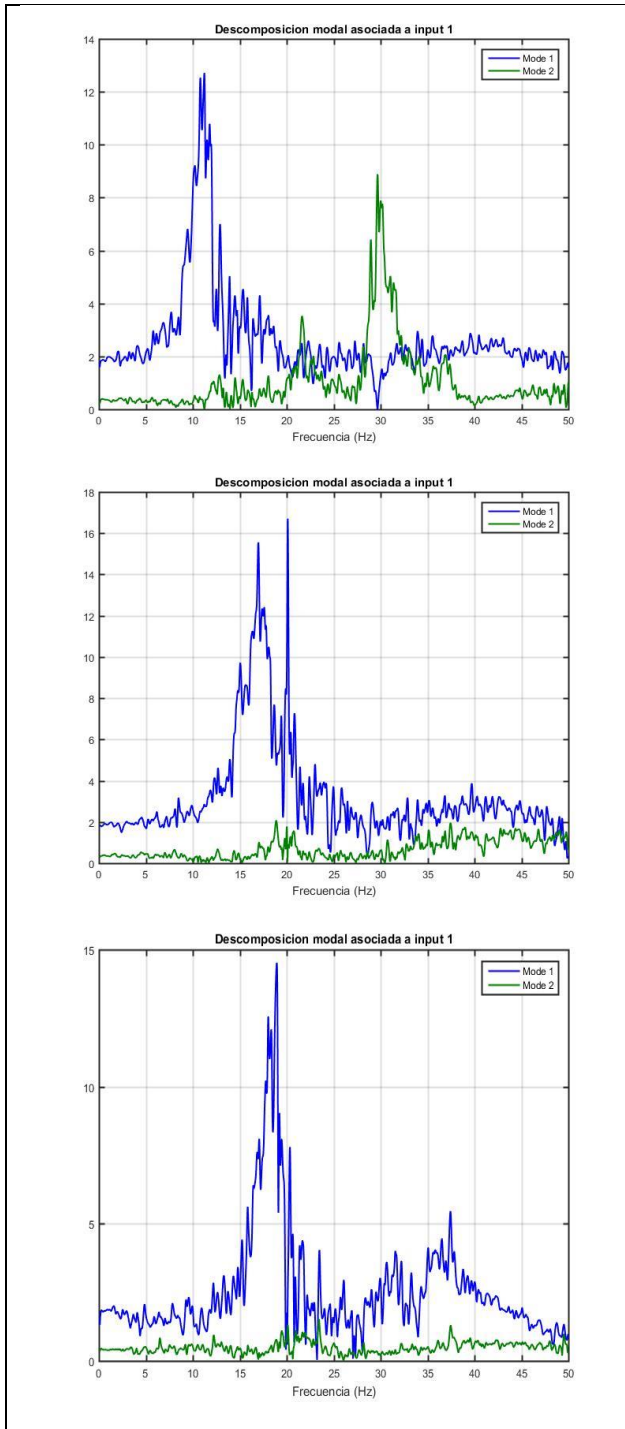


Figura 6.50. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 1. Ventanas #1, #150, #275, respectivamente. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

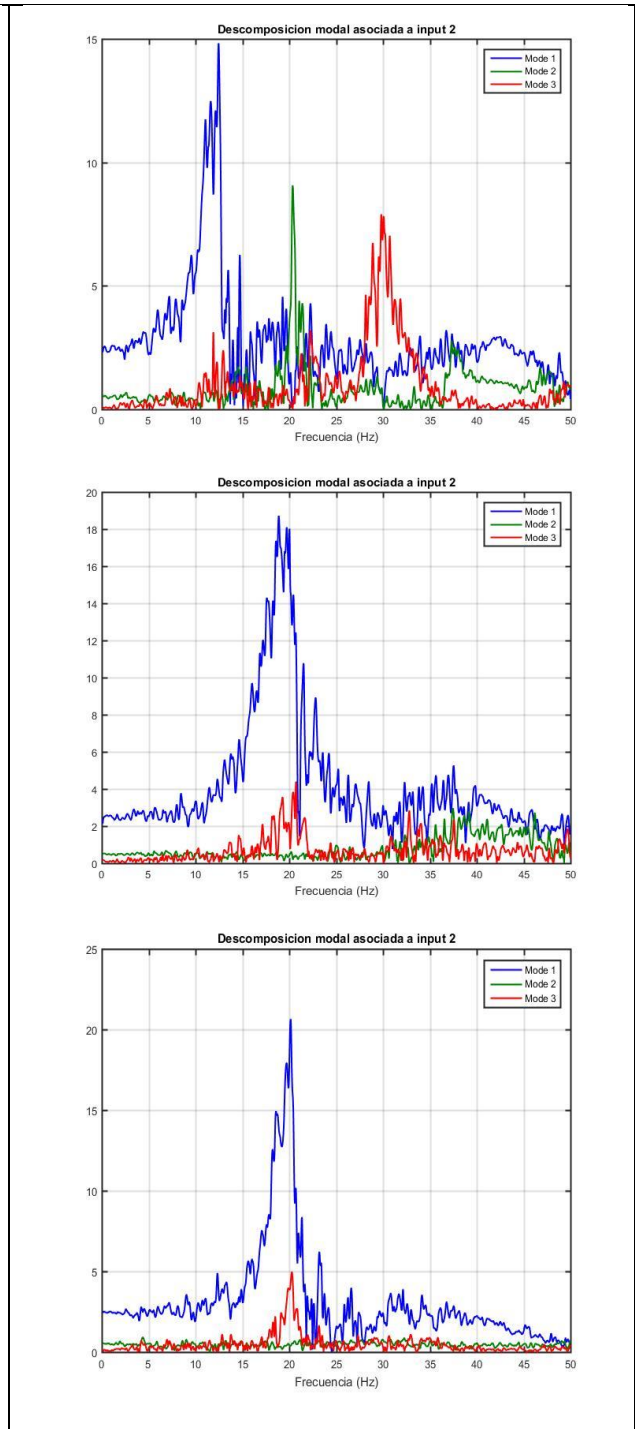


Figura 6.51. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 2. Ventanas #1, #150, #275, respectivamente. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

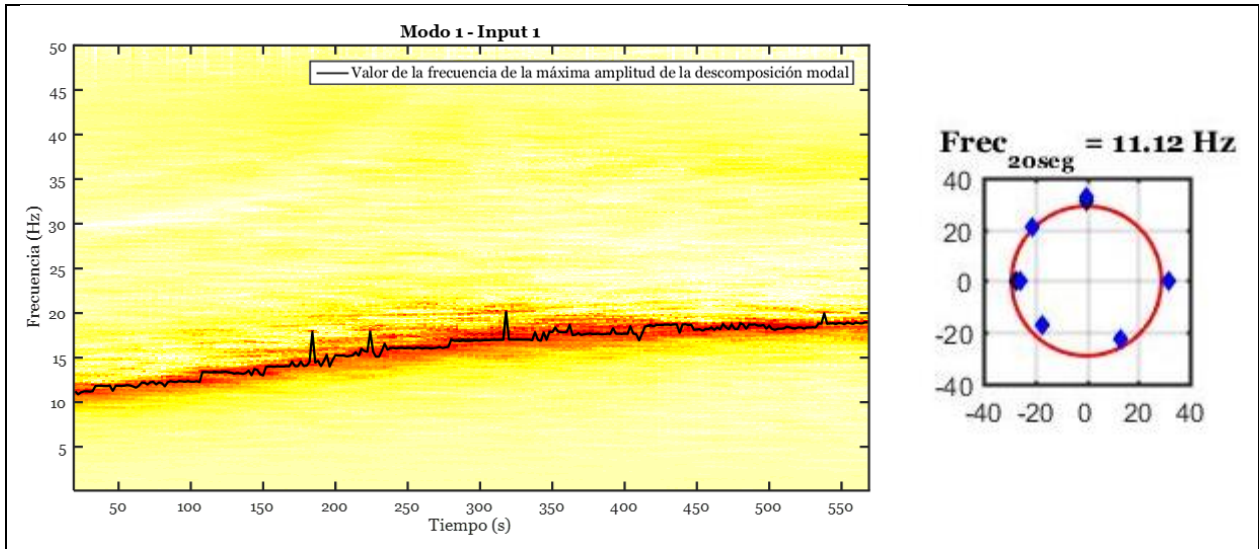


Figura 6.52. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 1. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

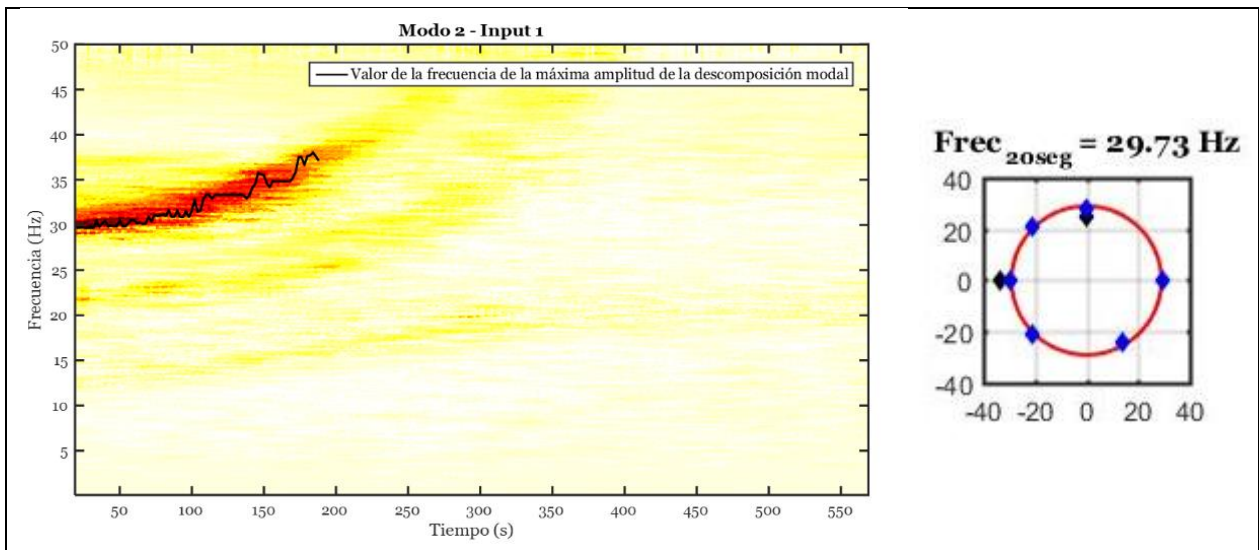


Figura 6.53. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 2 del input 1. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

El modo 1 y modo 2 asociados al input 1 identificados con el método SMFDD (ver Figura 6.52 y Figura 6.53) corresponden al modo 1 y modo 6, respectivamente, identificados en los métodos ITD y DSI.

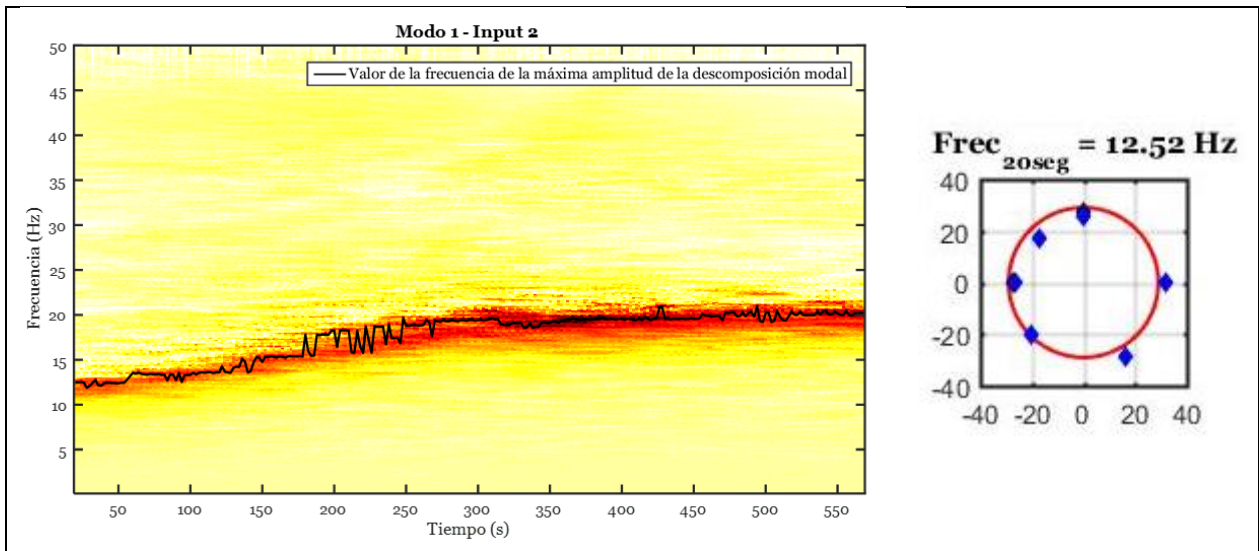


Figura 6.54. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 2. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

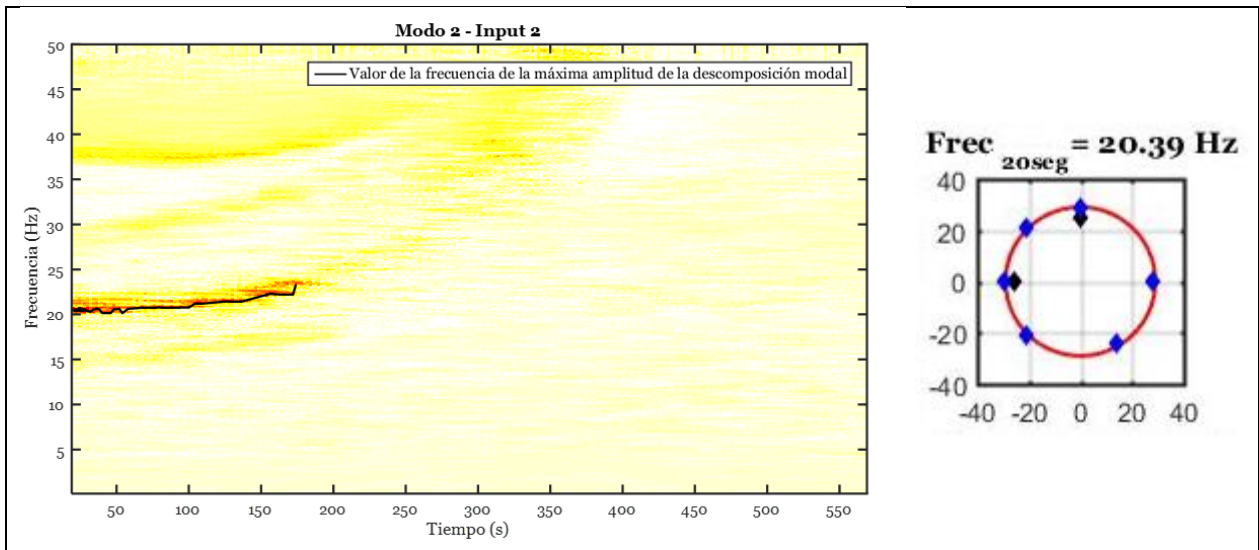


Figura 6.55. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 2 del input 2. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

El modo 1 y modo 2 asociados al input 2 identificados por SMFDD (ver Figura 6.54 y Figura 6.55) corresponden al modo 2 y modo 3, respectivamente, identificados en los métodos ITD y DSI.

El modo 3 asociado al input 2 que se ve identificado en la ventana #1 de la descomposición modal (Figura 6.51), es posible reconocerlo al inicio del registro.

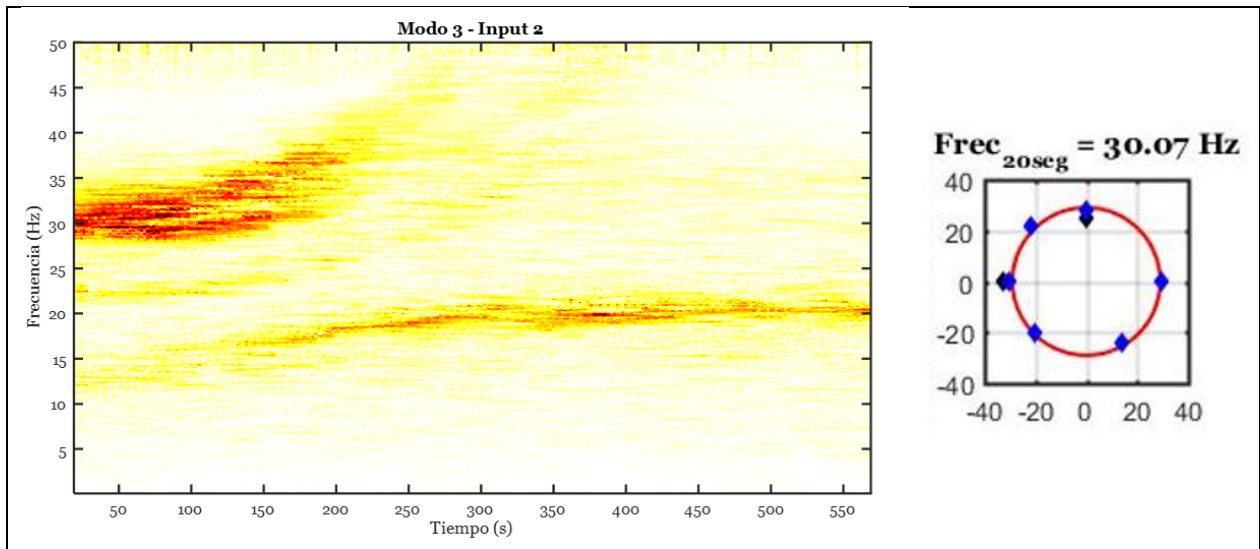


Figura 6.56. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 3 del input 2. Excitación basal AS692, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 73,1 \text{ cm}$, registro a12vaciado731.

6.4.1.2. Vaciado de estanque sometido a excitación basal AF691, altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$

Tabla 6.13. Parámetros necesarios para la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Rotación de inputs	-41°
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
Frecuencia de resamplado (Hz)	500
Duración de la ventana de tiempo (s)	40
Traslapo (Tiempo entre ventanas)	2%
Cantidad de ventanas	207

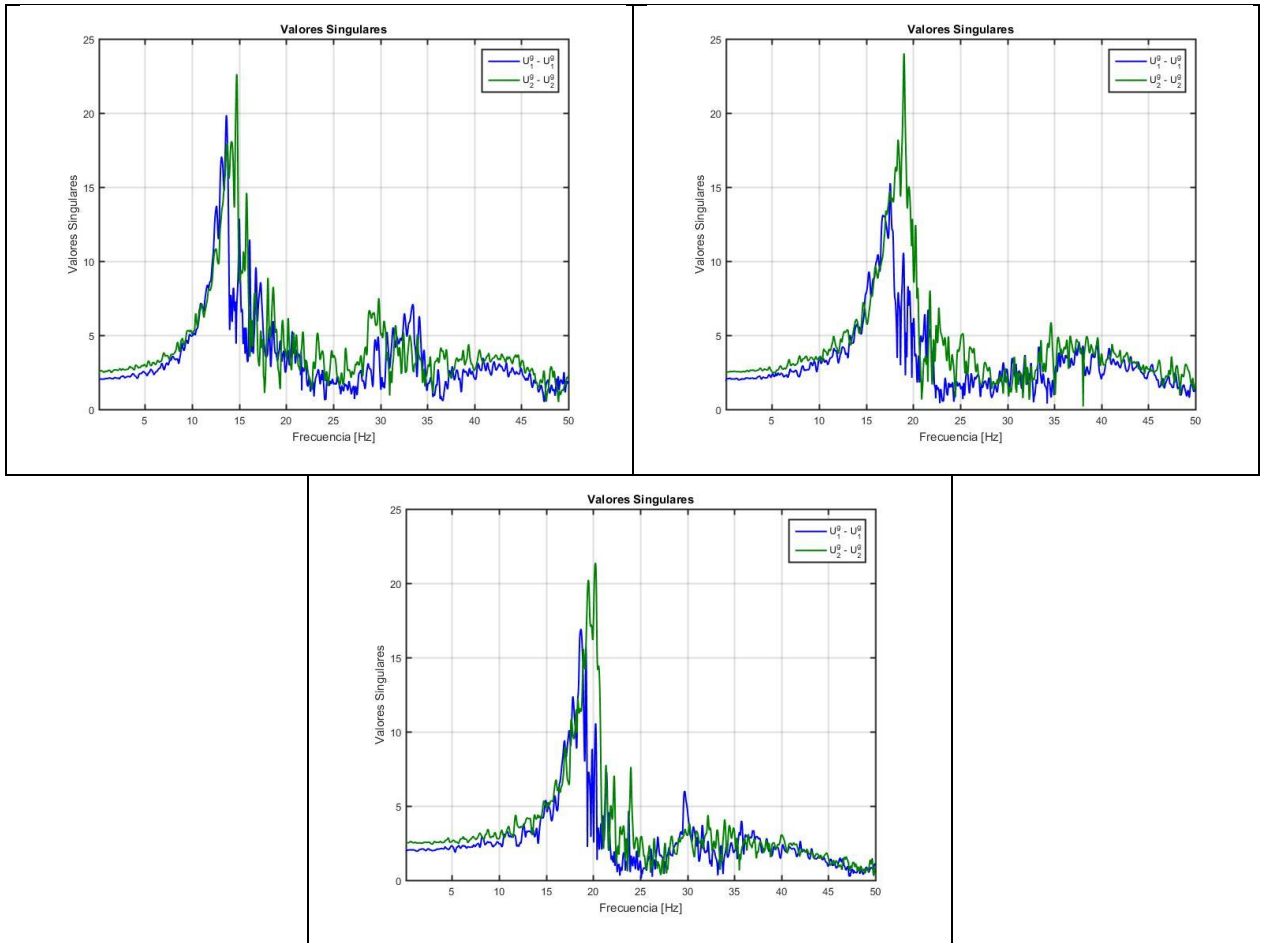


Figura 6.57. Valores singulares por pequeñas ventanas asociada a cada input. Ventanas #1, #100, #207, respectivamente. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.

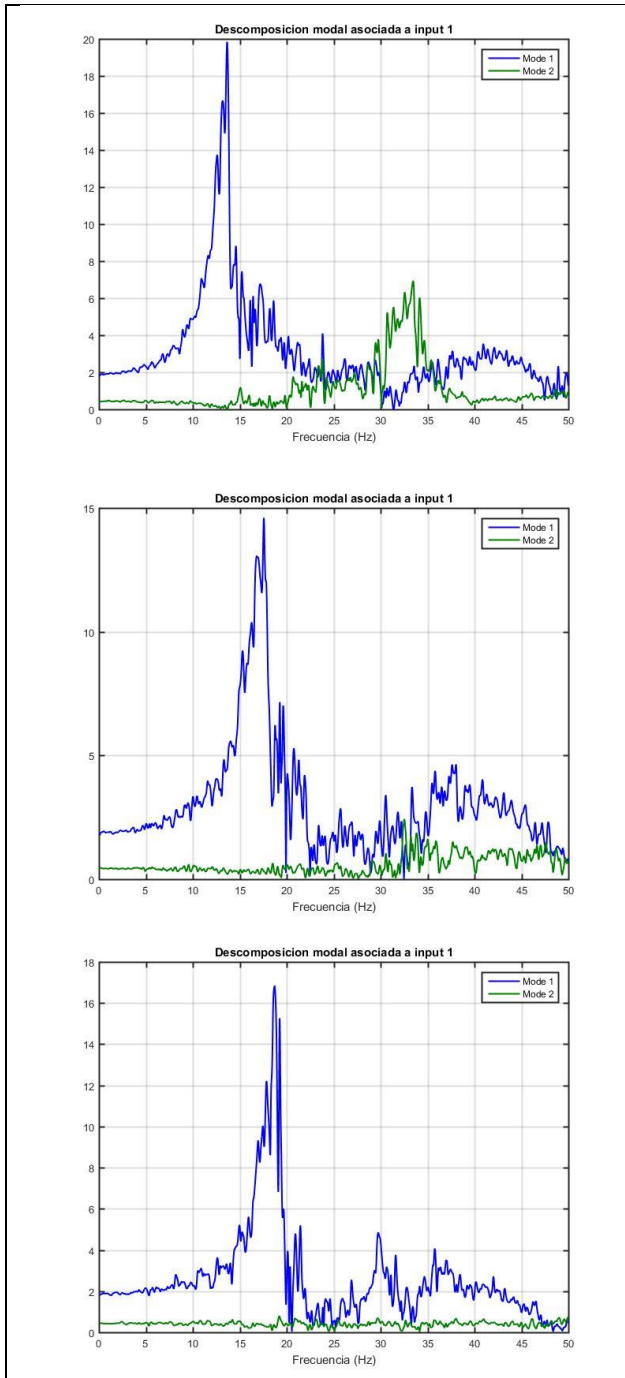


Figura 6.58. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 1. Ventanas #1, #100, #207, respectivamente. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.

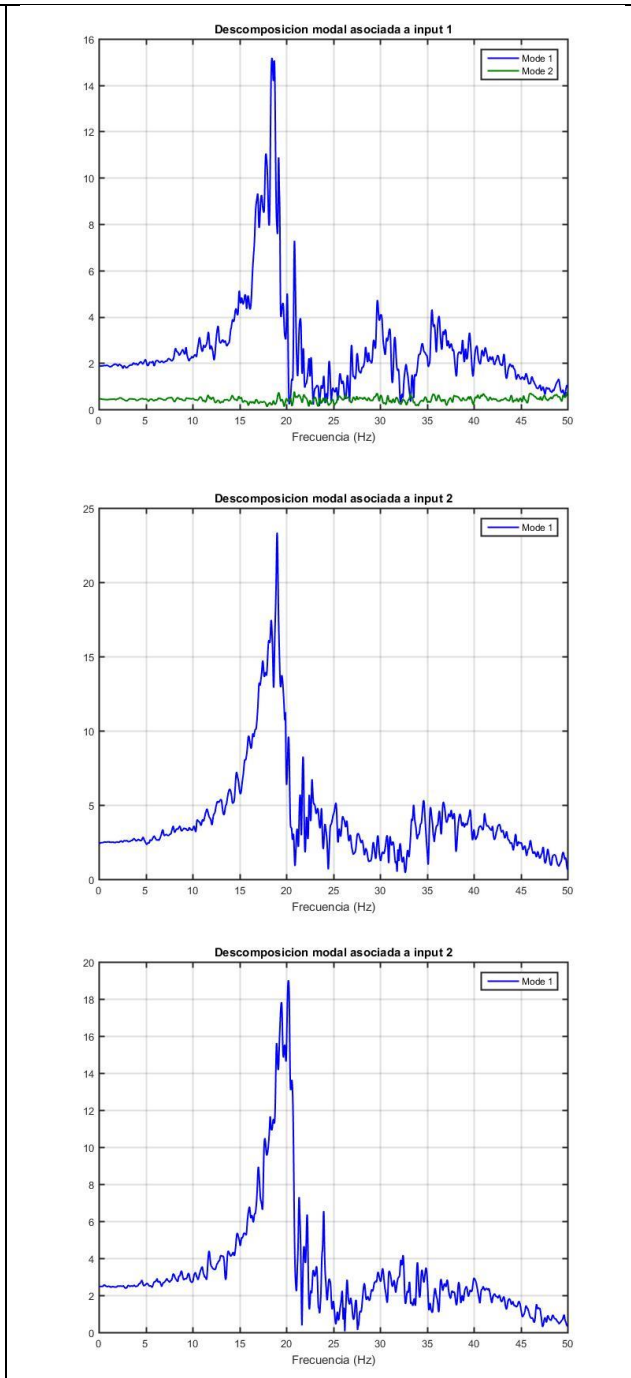


Figura 6.59. Descomposición modal por pequeñas ventanas asociada a input 2. Ventanas #1, #100, #207, respectivamente. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.

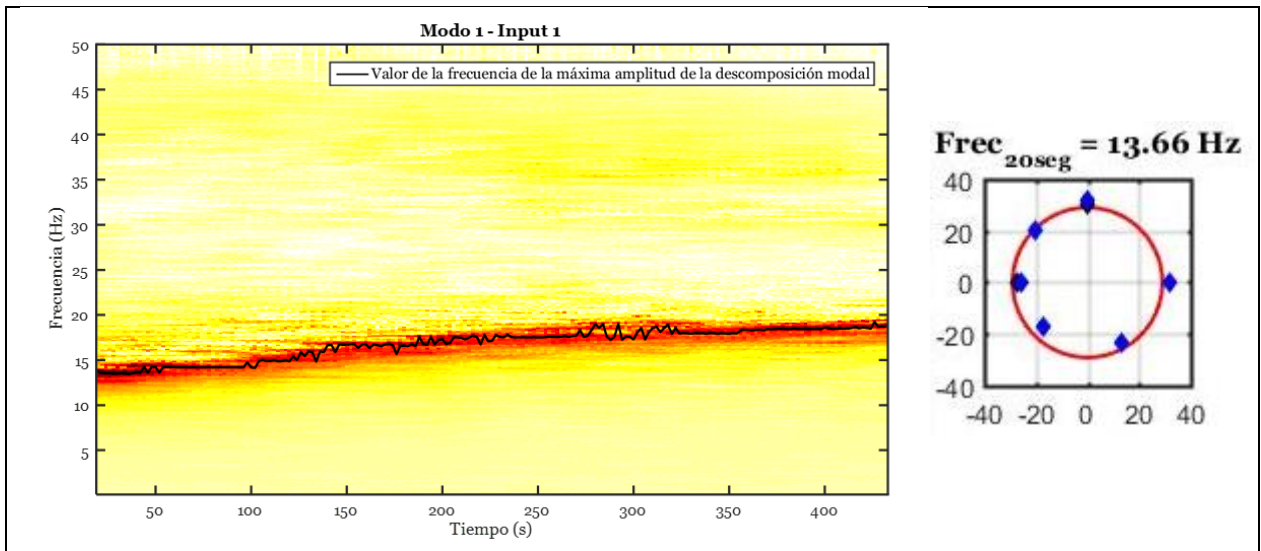


Figura 6.60. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 1. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.

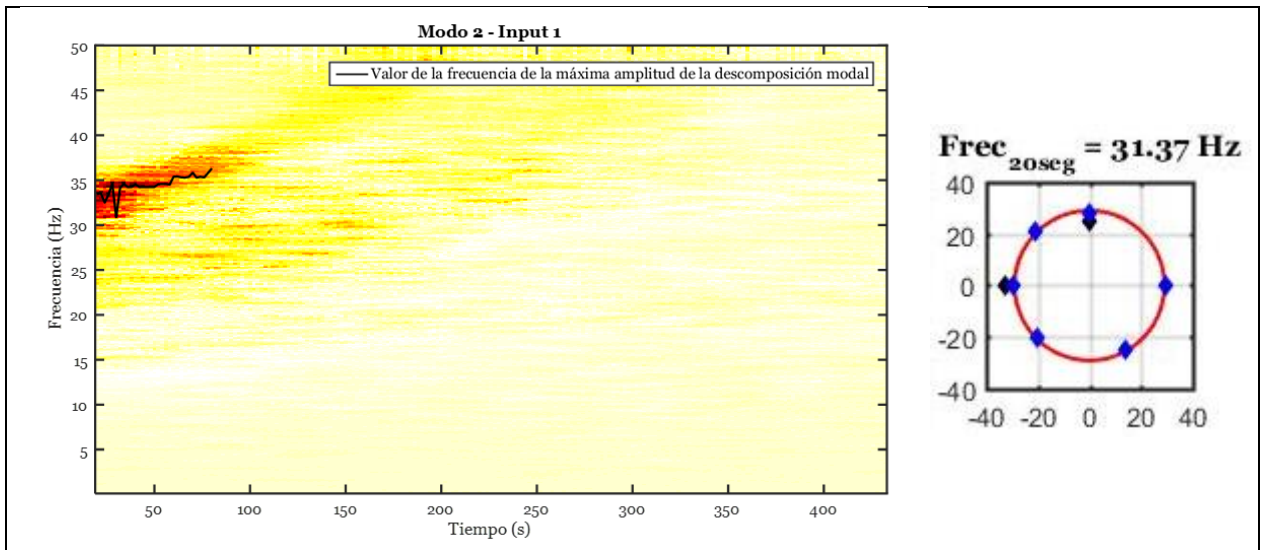


Figura 6.61. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 2 del input 1. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.

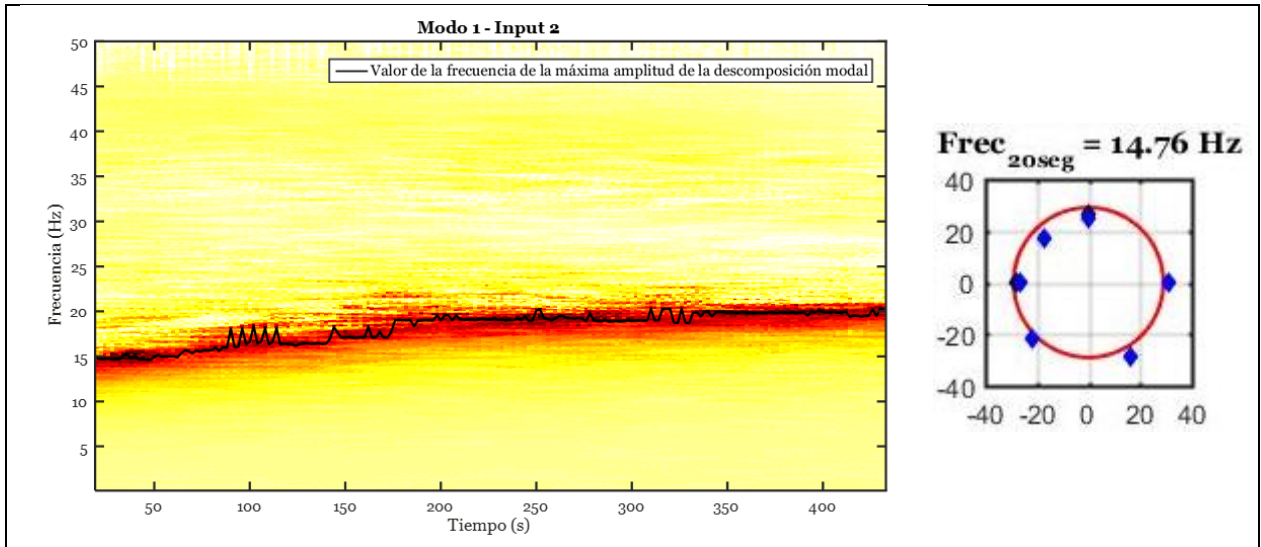


Figura 6.62. Variación de frecuencia natural y forma modal identificada en la ventana #1, asociada al modo 1 del input 2. Excitación basal AF691, vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, registro a21vaciado623.

Análogo al caso anterior, el modo 1 del input 1 y el modo 1 del input 2, corresponden a los modos 1 y 2, respectivamente, identificados con ITD y DSI.

Nuevamente, se aprecia la ortogonalidad de las dos primeras formas modales y el desacople de aquellas.

6.4.2. Resumen y análisis de resultados, método SMFDD

SMFDD se presenta en un gráfico de tonalidades en el espacio tiempo-frecuencia, se observa similitud con los gráficos presentados en espectrogramas y tTFF. Sin embargo, se desagrega el contenido de energía de los modos identificados. Cabe mencionar que no se empleó ningún filtro en el análisis y que la descomposición es realizada directamente por el método.

Dado el fundamento teórico, las representaciones tiempo-frecuencia obtenidas de SMFDD corresponden a la función de transferencia de cada modo j -ésimo asociado a un input i -ésimo. En este sentido, esta representación es insensible a la amplitud del movimiento sísmico o a su contenido de frecuencia.

Con respecto a las formas modales, se identifican dos perpendiculares, que se obtienen gracias a la desagregación que se genera al considerar inputs proyectados y al hecho que se emplean varios canales de salida que permiten la desagregación de la respuesta de cada modo.

Al igual que en los demás métodos, es la respuesta impulsiva el que predomina en la estructura y el modo convectivo no tiene una participación aparente.

La ventaja de emplear SMFDD por pequeñas ventanas de tiempo radica en que la metodología al usar múltiples sensores que permiten desagregar la respuesta de modos de frecuencias cercanas (o idénticas). Además, permiten una representación tiempo-frecuencia para cada modo en forma separada.

Se presenta a continuación la Tabla 6.14 donde se muestran el promedio de las frecuencias identificadas a partir del máximo local de las representaciones tiempo-frecuencia del método SMFDD determinadas para diversas alturas para los primeros 6 modos fundamentales.

Tabla 6.14. Frecuencias de cada modo identificado con respecto a la altura de agua al interior del estanque.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
			Frecuencias (Hz)					
73,10	186,05	201,48	10,47	11,28	20,37	N.I.	N.I.	28,29
68,30	177,00	192,42	11,23	11,84	20,56	N.I.	N.I.	29,77
62,30	161,00	176,43	11,93	12,46	21,39	N.I.	N.I.	30,26
60,10	154,70	170,12	12,70	12,94	21,34	N.I.	N.I.	30,40
55,90	144,40	159,83	13,72	14,20	22,41	N.I.	N.I.	31,74
50,30	128,60	144,02	14,16	14,61	23,23	N.I.	N.I.	32,67
46,00	118,50	133,93	15,53	16,32	25,08	N.I.	N.I.	35,35
40,50	103,00	118,42	16,30	16,51	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
33,80	86,40	101,83	16,37	16,91	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
31,50	79,45	94,87	16,69	17,07	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
23,00	57,75	73,18	17,33	17,66	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
20,20	49,50	64,92	17,96	19,03	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
13,70	33,75	49,18	18,24	19,06	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
10,50	24,40	39,83	18,23	19,02	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
0	0	15,43	18,46	19,05	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.

6.5. Resumen general y validación del método SMFDD

Con el fin de validar su aplicación, los resultados de SMFDD son comparados con los otros métodos de identificación utilizados en el procesamiento de datos de registros de respuesta y se muestran en los siguientes gráficos (datos numéricos se encuentran en las tablas comparativas del Anexo E). Se señala en estos mismos, la frecuencia inicial y final identificada promediada por los 3 métodos. Además, a continuación, se señala la forma modal identificada definitiva para cada modo, representada con la config. B de sensores.

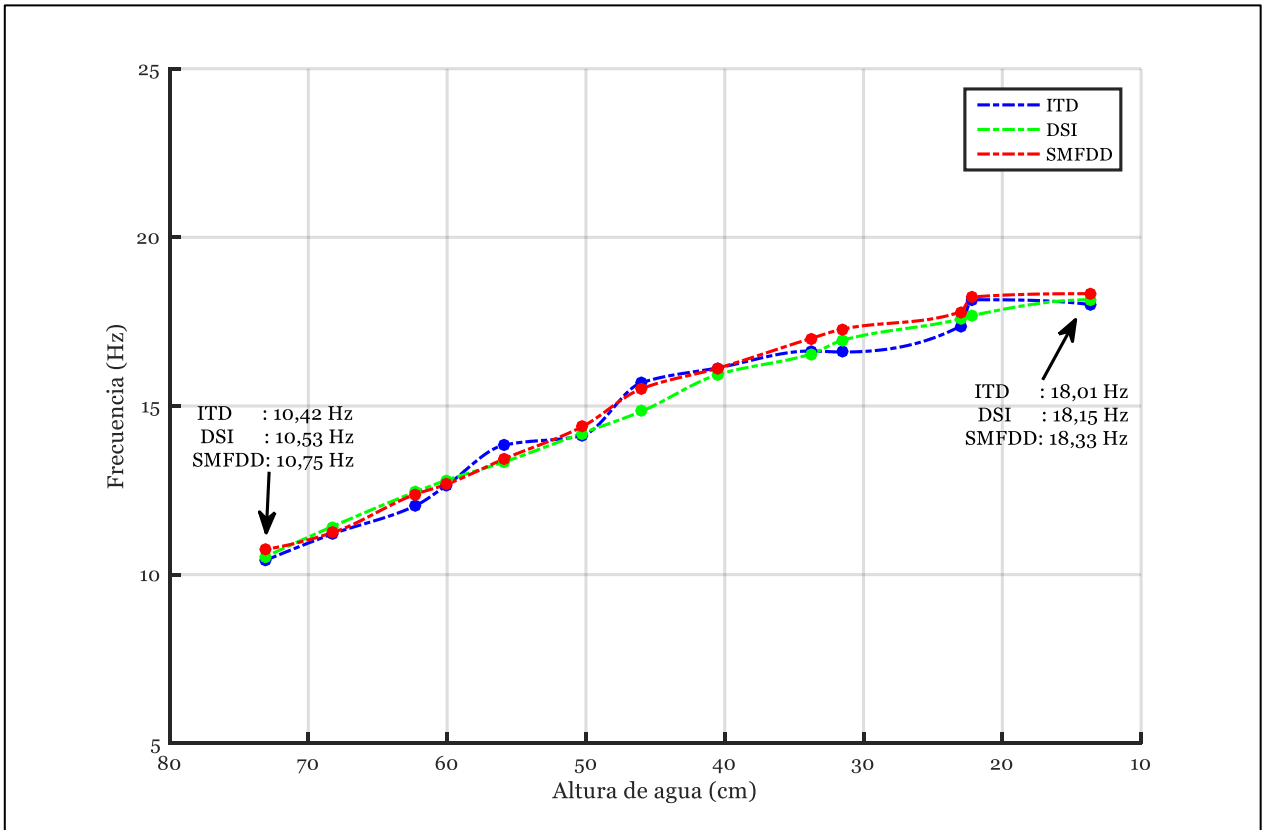


Figura 6.63. Variación de frecuencia del Modo 1, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.

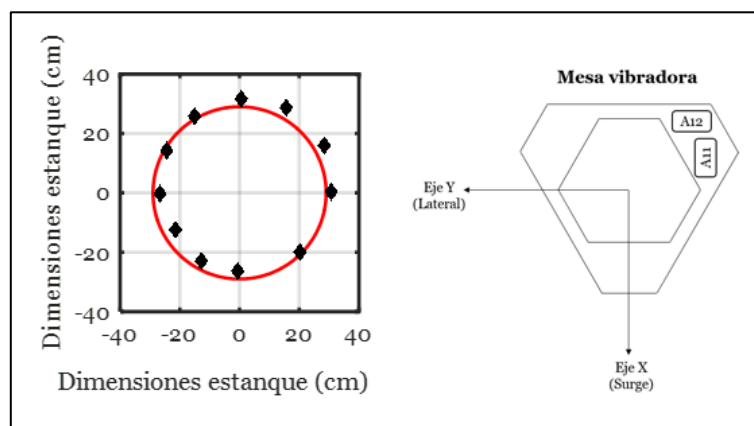


Figura 6.64. Forma modal identificada Modo 1.

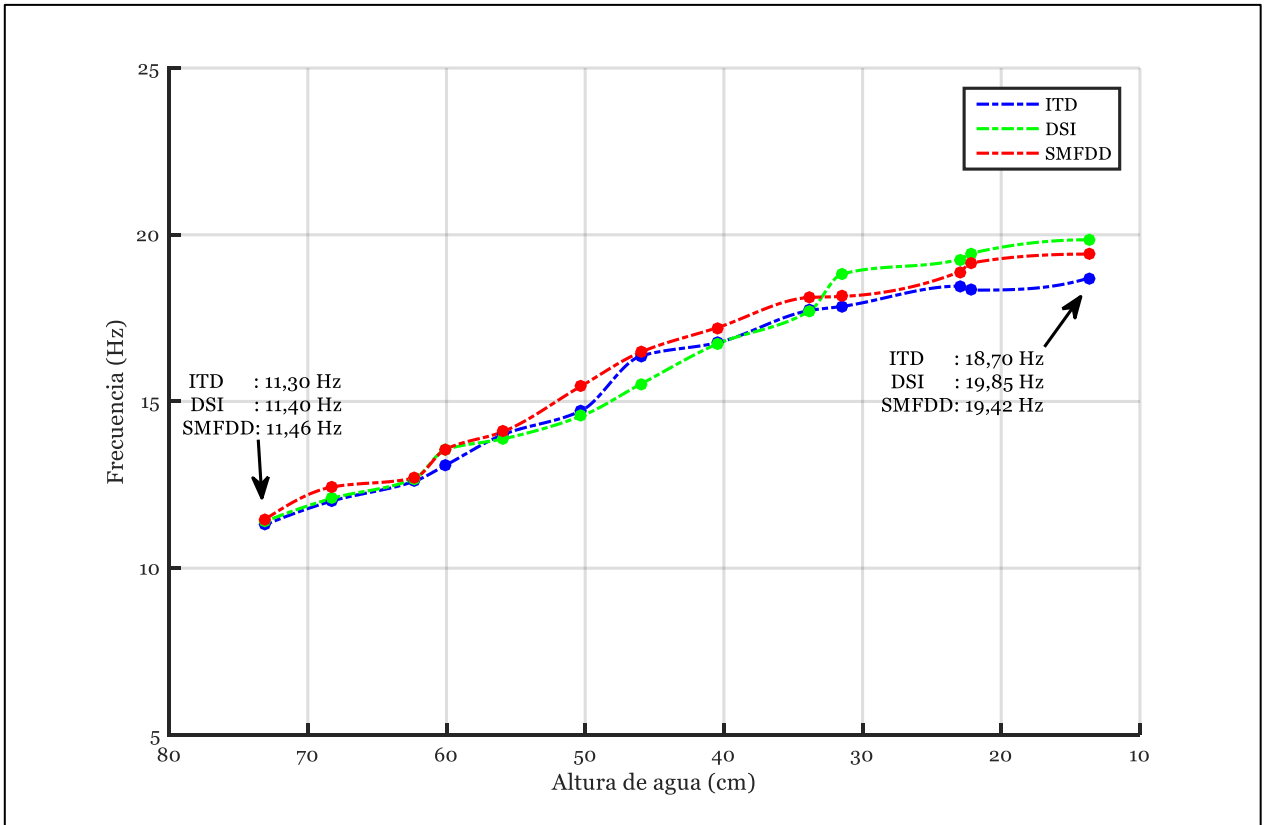


Figura 6.65. Variación de frecuencia del Modo 2, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.

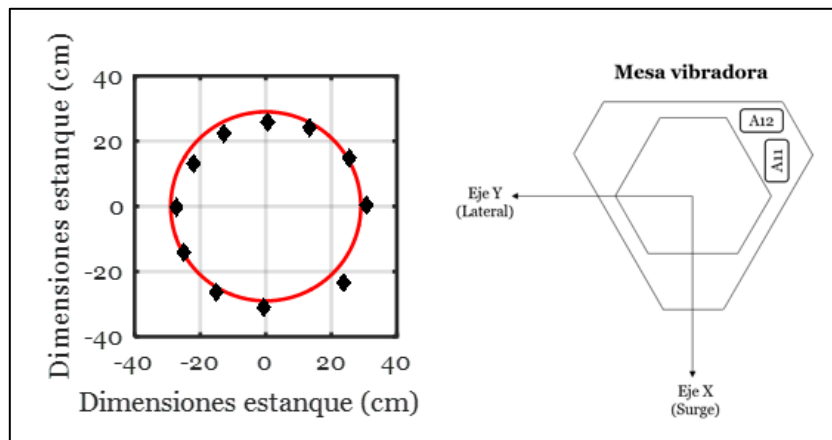


Figura 6.66. Forma modal identificada Modo 2.

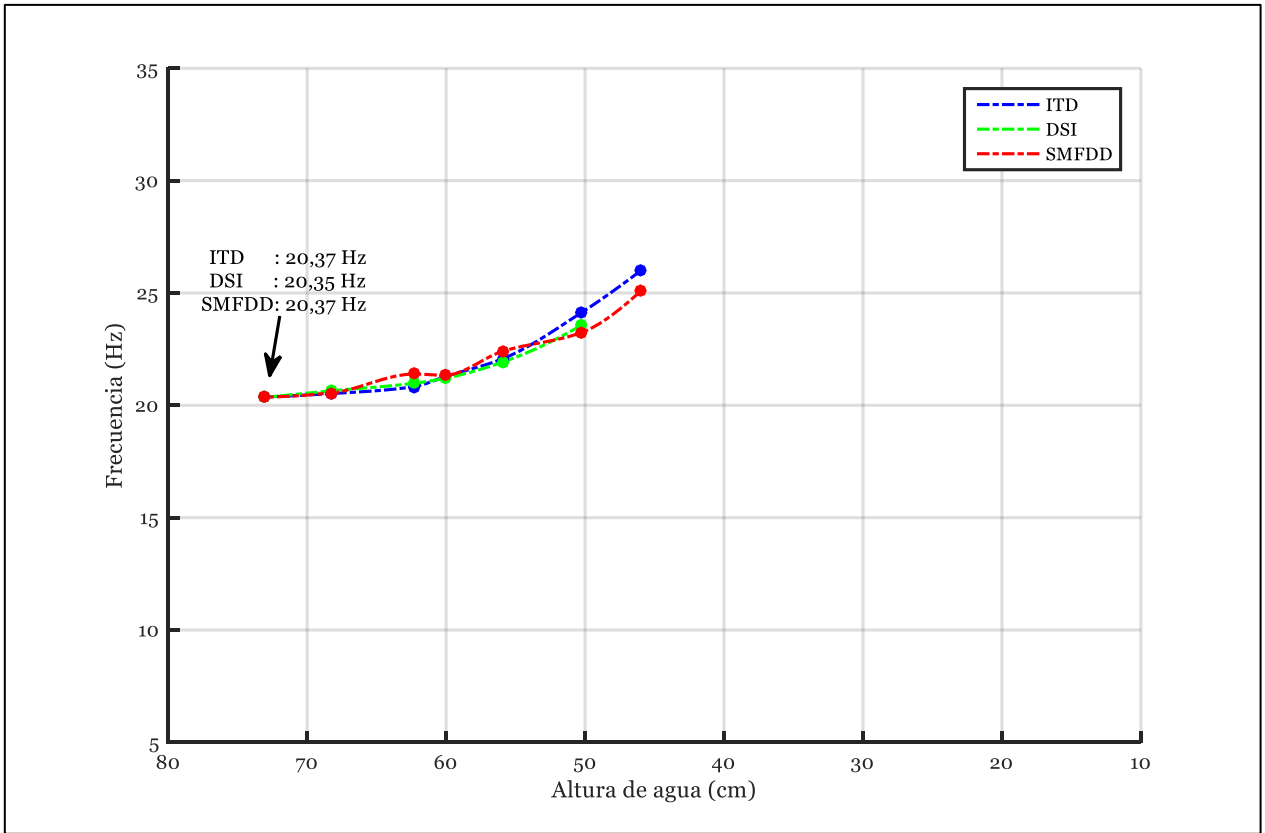


Figura 6.67. Variación de frecuencia del Modo 3, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.

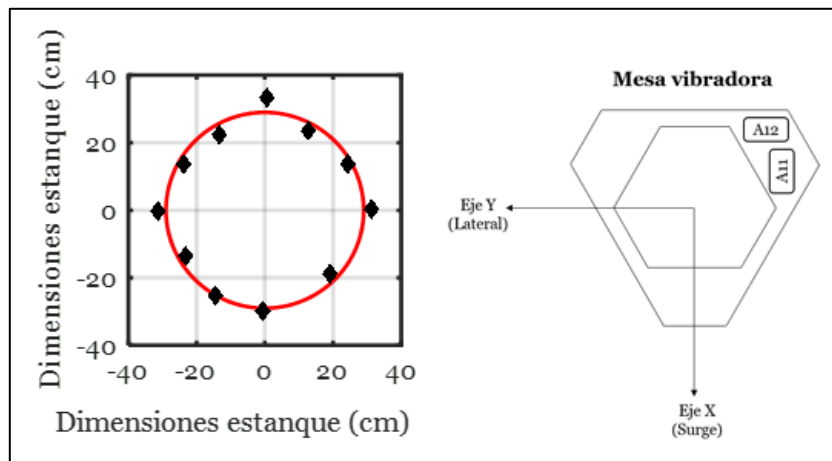


Figura 6.68. Forma modal identificada Modo 3.

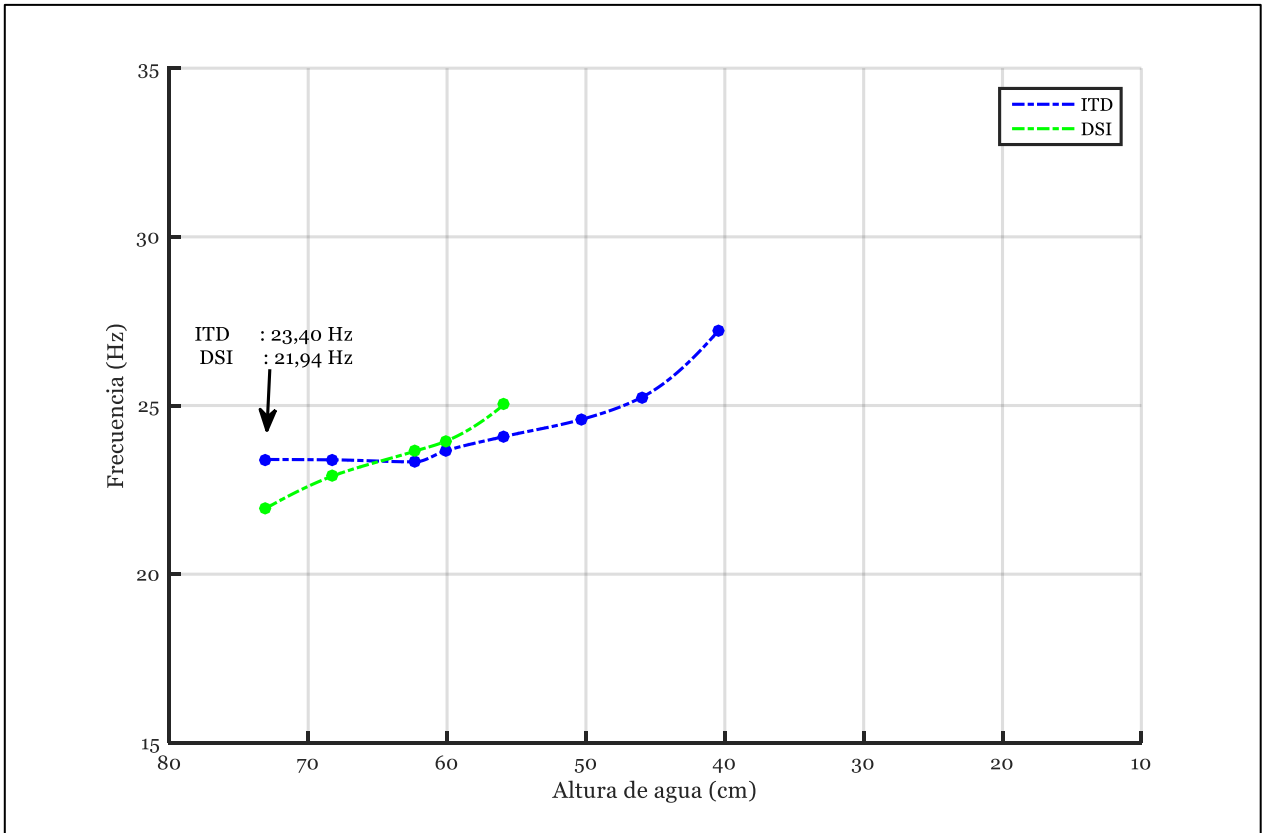


Figura 6.69. Variación de frecuencia del Modo 4, resultados de los métodos ITD y DSI.

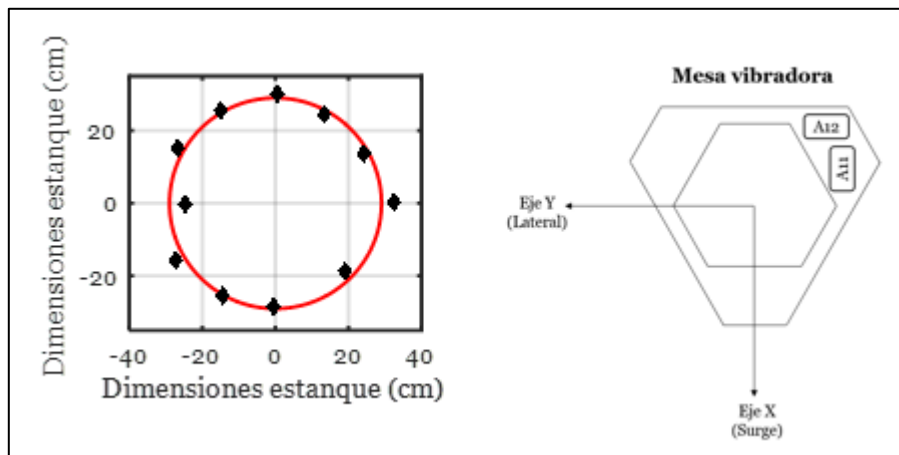


Figura 6.70. Forma modal identificada Modo 4.

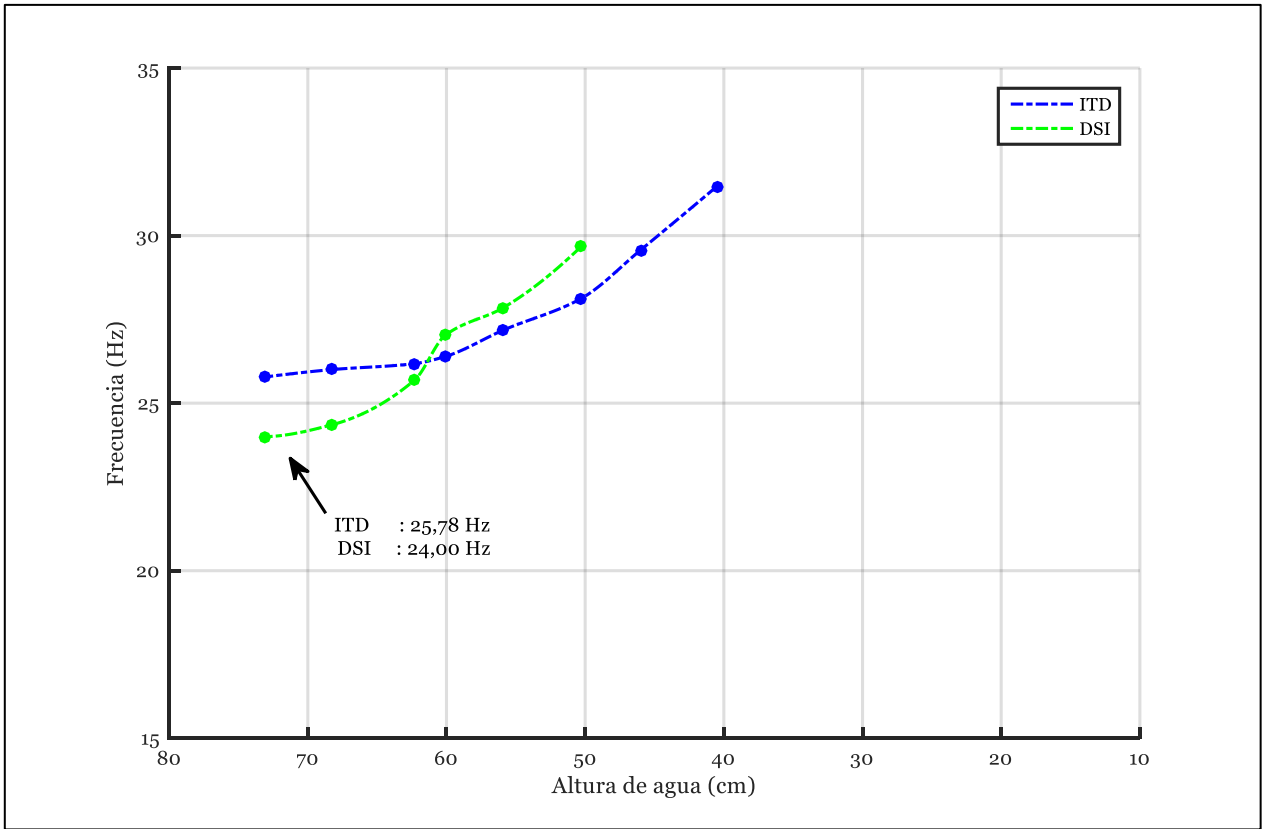


Figura 6.71. Variación de frecuencia del Modo 5, resultados de los métodos ITD y DSI.

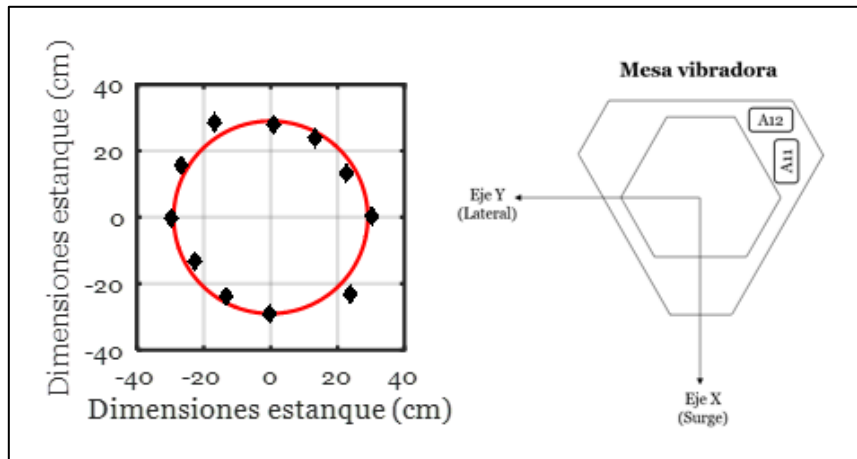


Figura 6.72. Forma modal identificada Modo 5.

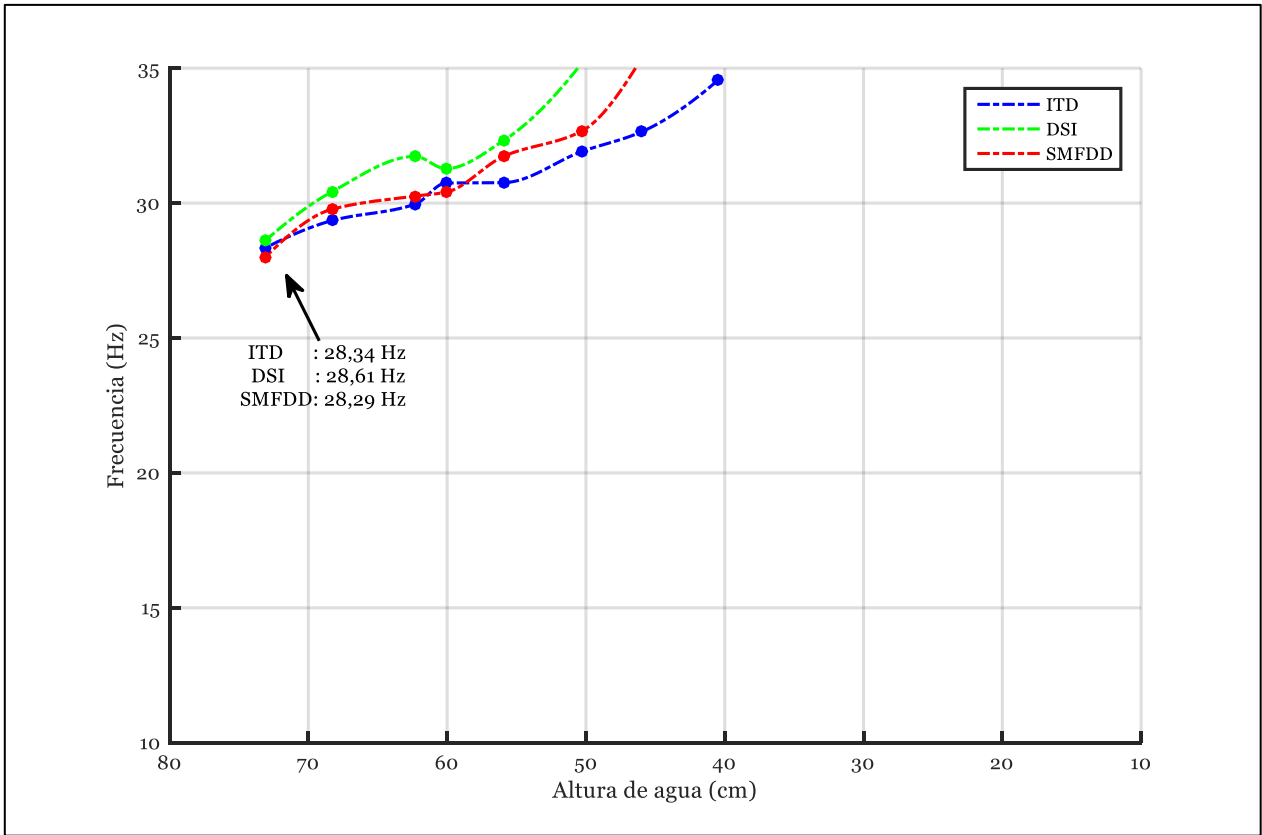


Figura 6.73. Variación de frecuencia del Modo 6, resultados de los métodos ITD, DSI y SMFDD.

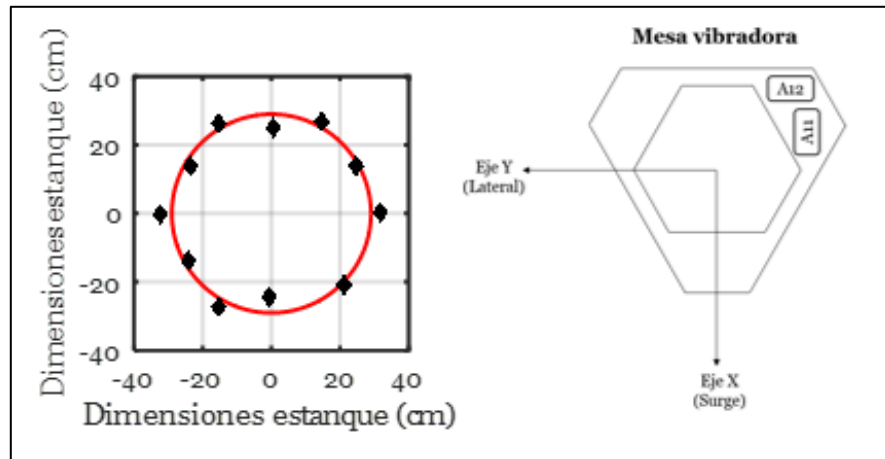


Figura 6.74. Forma modal identificada Modo 6.

Notar que en los modos 4 y 5 sólo se comparan los métodos ITD y DSI debido a que el método SMFDD no los identifica.

Capítulo 7

Conclusiones y comentarios

El estudio presentado en esta memoria valida la aplicación del método SMFDD por pequeñas ventanas de tiempo en el análisis de la respuesta de aceleración de una estructura simétrica para la identificación de propiedades dinámicas, en especial si la estructura presenta frecuencias variables en el tiempo y modos con frecuencias cercanas.

Para lo anterior, se estudió y comparó el análisis de la respuesta estructural de un estanque de almacenamiento de líquidos empleando los métodos ITD, DSI, Espectrograma, tTF y SMFDD, permitiendo analizar y comparar la evolución de las propiedades dinámicas cuando el estanque es vaciado en el tiempo. Además, se recopiló información respecto a las teorías que describen la respuesta de un estanque que almacena líquido.

Las principales conclusiones de este estudio son:

El estudio experimental muestra que el nivel del agua al interior del estanque tiene un importante efecto en la variación de los valores de las frecuencias naturales y razones de amortiguamiento. Las frecuencias fundamentales identificadas decrecen gradualmente con el incremento del nivel del agua para todos los modos de vibración considerados. Además, el nivel del agua no tiene considerables efectos en las formas modales.

Los métodos de identificación son capaces de detectar el comportamiento del modo impulsivo de la estructura. La frecuencia del primer modo fundamental del estanque se encuentra entre los 10 Hz y 11 Hz cuando el volumen de agua en su interior es igual al 85% de su capacidad máxima (187,53 L), y entre los 19 Hz y 20 Hz cuando el estanque está vacío.

Las dos primeras formas modales identificadas son transversales con un ángulo aproximado de 98° entre ellas y poseen frecuencias similares. Aquellas, fueron detectadas por todos los métodos excepto por la aplicación de espectrogramas y tTF, que no son capaces de desagregar el contenido de energía de modos de frecuencias similares.

El método ITD logra la identificación de las formas modales perpendiculares gracias a que los golpes realizados en los ensayos de impacto se aplicaron en diversas direcciones, observándose que los impactos 1 y 3 coincidían con la dirección de los modos principales del estanque. Esto se concluye debido a que los impactos en la zona 3 (que no coincide con

la ninguna dirección de formas modales) sólo inducían excitación en uno de los dos primeros modos de vibrar. Por otro lado, con respecto a las razones de amortiguamiento, no superan el 5% y no se puede establecer ninguna relación con el nivel del agua y este parámetro.

El método DSI debido a su análisis de estabilización de parámetros dinámicos, logra la identificación de formas modales distintas en frecuencias similares, las cuales resultan ser perpendiculares. Sin embargo, las razones de amortiguamiento que se obtienen resultan ser muy variables, lo cual se atribuye a la inestabilidad del método y/o al comportamiento altamente no-lineal del líquido almacenado (respuesta turbulenta) que genera un comportamiento no-lineal de la estructura debido a la interacción fluido-estructura que se traduce principalmente en una alta variación del amortiguamiento.

Así es entonces como se utiliza el método Función de Transferencia por pequeñas ventanas de tiempo (tfTF) para llevar a cabo una comparación de las frecuencias variantes en el tiempo obtenidas con los métodos ITD y DSI, verificando y respaldando los resultados obtenidos. Por ello, se presentan en un mismo gráfico los 3 métodos mencionados, para trabajar con ellos en conjunto y comparar los resultados. Cabe mencionar que los resultados de ITD muestran una tendencia similar a los resultados observados por otros métodos que se aplican para excitaciones basales.

A pesar que se presenta los resultados de espectrogramas con la superposición de los métodos ITD y DSI, es preferible trabajar con tfTF debido a que este último considera tanto datos de salida como de entrada y no depende de la amplitud o del contenido de frecuencia del input considerado.

La implementación del método SMFDD por pequeñas ventanas de tiempo trae consigo la identificación de parámetros dinámicos muy similares a los ya determinados con otras técnicas, con una diferencia no superior al 5% con respecto a los otros métodos. Tal comparación da como resultado la validación del método implementado.

Los resultados indican claramente que la técnica implementada es capaz de identificar modos cercanos con alta precisión y que no es significativamente sensible al ruido. Se propone verificar la dispersión del método en estudios posteriores.

La ventaja de emplear SMFDD por pequeñas ventanas de tiempo radica en que la metodología, al usar múltiples sensores como inputs y outputs, permite desagregar y descomponer directamente la respuesta modal, identificando con una mayor eficacia los modos de frecuencias similares (o idénticas).

En relación con la comparación de las frecuencias identificadas y los resultados teóricos determinados a partir de las ecuaciones de Housner o API 650 se observa que los resultados asociados a los modos impulsivos no son comparables. Esto se puede atribuir a diversos

efectos: 1) las propiedades del material HDPE fueron supuestas conforme a los valores nominales disponibles en la literatura y por tanto puede existir una variación respecto a los valores reales, 2) el estanque no era exactamente cilíndrico, sino que presentaba cierto nivel de curvatura, 3) las ecuaciones de Housner y API 650 están calibradas para estanques de grandes dimensiones y de otro material, 4) el estanque presenta una especie de diafragma rígido en la parte superior que puede cambiar significativamente el comportamiento (como se indican en varios trabajos teóricos de estanque de almacenamiento de líquidos); por tanto las ecuaciones de Housner y API 650 son inexactas para el caso en estudio.

Por otra parte, la teoría de Housner y las normas de diseño de estanques señalan las frecuencias del modo convectivo, las cuales son poco variables con el nivel de llenado, con un valor de 1,26 Hz para estanque lleno y 1,06 Hz cuando está prácticamente vacío. Cabe mencionar que el periodo de oscilación del líquido superficial (oleaje) presentaba un periodo similar, el cual fue visualizado en las cámaras GoPro instaladas durante los ensayos (cercano a 1 Hz). Es importante mencionar que todos los sensores mostraban una componente de energía significativa en baja frecuencia, lo cual se atribuye al hecho que la mesa de vibrar generaba un movimiento predominante en frecuencias bajas. Sin embargo, al determinar la función de transferencia entre los canales instalados en la parte superior del estanque en relación a la base, no se pudo observar una amplificación del movimiento en bajas frecuencias. Esto indicaría que la estructura era suficientemente rígida de tal modo que la deformación (relativa) generada por el oleaje era de segundo orden en comparación con el movimiento generado en la base para bajas frecuencias. Otra explicación alternativa a este efecto se asociaría al hecho que el oleaje generaría una reacción basal que podría causar el movimiento en baja frecuencia de la mesa de vibrar, que sería significativamente mayor a la deformación relativa del estanque (i.e., la mesa sería más flexible que el estanque debido a las cargas generadas por el oleaje). Cabe mencionar que estas aseveraciones son sólo hipótesis y por tanto su corroboración requeriría estudios más profundos que están fuera del alcance de este trabajo. Por último, la altura máxima de ola que fue observada en los ensayos coincidió con los valores definidos por la teoría de Housner cuando se considera el espectro de desplazamiento asociado a una tasa de amortiguamiento cercana al 1%.

Capítulo 8

Bibliografía

- Aguilar, A. A., Boroschek, R. L., & Massone, L. M. (2012). Topics on the Dynamics of Civil Structures, Volume 1. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 1(January 2012), 389–400. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2413-0>
- American Concrete Institute, A. (2001). ACI 350.3 Seismic Design of Liquid -Containing Concrete Structures. *ACI 350.3-01 – Code requirements for environmental engineering concrete structures*.
- American Petroleum Institute. (2007). API 650: Welded storage tanks for oil storage.
- Astroza, R., Gutiérrez, G., Repenning, C., & Hernández, F. (2018). Time-variant modal parameters and response behavior of a base-isolated building tested on a shake table. *Earthquake Spectra*, 34(1), 121–143. <https://doi.org/10.1193/032817EQS054M>
- Banner. (2013). U-GAGE™ S18U Series Sensors with Analog Output 18. Opgehaal van www.bannerengineering.com
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. In *IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference* (bll 625–630). San Antonio, Texas, USA.
- Castro T., R. (2016). Introducción al Análisis Modal Operacional. In *Jornada sobre el comportamiento estructural y monitorización de estructuras*. Málaga.
- Chopra, A. (2014). Dinámica de Estructuras. *4ta Edición Pearson Education*.
- Díaz, P. (2017). Análisis de Estructuras Aisladas con el Método de Múltiples Sub-Estructuras.

- Ewins, D. J. (2000). *Modal Testing: Theory and practice*. UK. [https://doi.org/10.1016/03783804\(88\)90154-4](https://doi.org/10.1016/03783804(88)90154-4)
- Gutierrez Lihn, G. (2016). *Identificación de las propiedades dinámicas variantes e invariantes en el tiempo de un edificio de 5 pisos ensayado en mesa de vibrar*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Santiago de Chile.
- Hans Turck GmbH & Co.KG. (2018). Sensor ultrasónico de modo difuso S18UUAQ. Opgehaal van www.turck.com
- Hernández, F. J. (2009). *Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas*. Tesis.Uchile.Cl. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hernández, S. (2007). *Comparación del Diseño Sísmico de estanques de acero*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00393-018-0552-0>
- Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 381–387.
- Huňady, R., & Hagara, M. (2015). Experimental Investigation of Mode Shapes of Symmetric Structures. *Acta Mechanica Slovaca*, 19(3), 12–17. <https://doi.org/10.21496/ams.2015.018>
- Ibrahim, S.R. and Mikulcik, E. C. (1976). The Experimental Determination of Vibration Parameters from Time Responses. *Shock and Vibration Bulletin*, Bull. 46, part 5.
- Ibrahim, S.R. and Mikulcik, E. C. (1977). A Method for The Direct Identification of Vibration Parameters from the Free Responses. *Shock and Vibration Bulletin*, Bull. 47, part 4.
- Invensys. (n.d.). Medidores de agua potable domicialiaros - DN 13 mm y 19 mm. Opgehaal van <http://www.invensys.cl>
- Kistler Instruments Corporation. (n.d.). 8310A K-Beam ® Capacitive Accelerometers. Opgehaal van www.kistler.com

- Kistler Instruments Corporation. (2009). KISTLER Accelerometers.
- Lengvarský, P., Hagara, M., Schrötter, M., & Bocko, J. (2014). Modal Analysis of Axially Symmetric Structure. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), 265–269. <https://doi.org/10.12691/ajme-2-7-19>
- Meruane, V. (2014). Dinámica Estructural Apuntes para el curso ME706.
- Moog Inc. (2008). 6DOF2000E Motion System User's Manual. New York.
- Moslemi, M., & Kianoush, M. R. (2012). Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks. *Engineering Structures*, 42, 214–230. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.026>
- National Instruments. (2019). ¿Qué es Adquisición de Datos? Opgehaal 12 Februarie 2019, van <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- Pastor, M., Binda, M., & Harčarik, T. (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>
- Rucka, M., & Zielińska, M. (2015). Identification of dynamic parameters in the context of diagnostics of steel tank with different level of liquid. *Diagnostyka*, 16(1), 9–14. <https://doi.org/10.1101/gad.1963010>
- Sánchez S. H., V. O. (2014). Analisis Sismico de Tanques Cilindricos de Almacenamiento, 10. Opgehaal van http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_11/103.PDF
- Van Overschee, P., & De Moor, B. (1996). *Subspace Identification For Linear Systems. Conference Proceedings of the International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (Vol 2008). Belgium. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4650193>

Capítulo 9

Anexos

9.1. Anexo A: Datos experimentales

9.1.1. Medición de altura máxima de ola

Se presentan, en primera instancia, una captura por cada cámara en el mismo instante del interior del estanque cuando el agua está en reposo a altura de 59 cm, ver Figura 9.1, Figura 9.2 y Figura 9.3.

Cabe mencionar que el procedimiento para las mediciones consiste en obtener la lectura de la huincha métrica que muestran las imágenes de video y aquel valor restarlo de la altura máxima considerada por el nivel de la cota de huincha que es 85 cm.

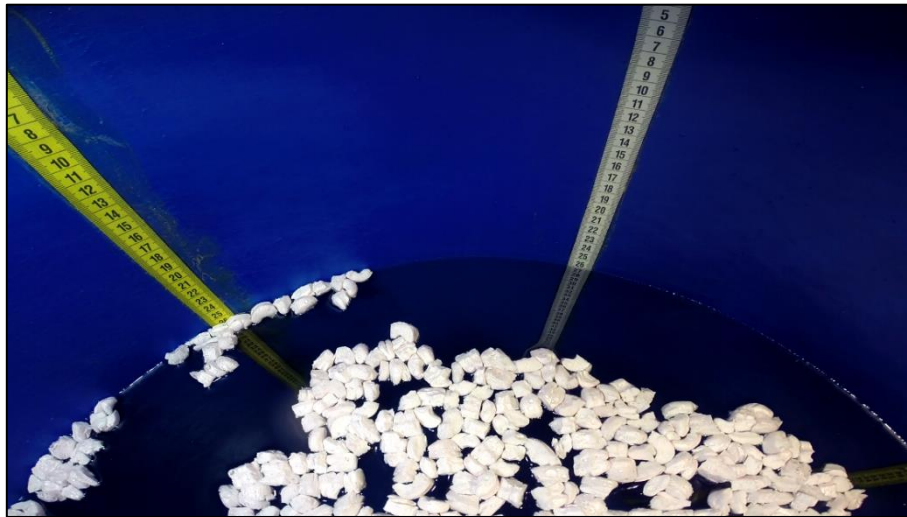


Figura 9.1. Captura extraída del video grabado por la cámara GP1, dirección 30° con respecto al eje X.

La Tabla 9.1 se muestran las lecturas máximas de huincha obtenidas al aplicar la excitación basal AS692 al estanque cuando contiene una altura de agua de 46 cm, 59 cm y 73,5 cm, y la lectura máxima cuando se aplica la excitación basal AF691 con 59 cm de altura de agua. Además, contiene el cálculo del parámetro d definido en la teoría de Housner (Capítulo 2).

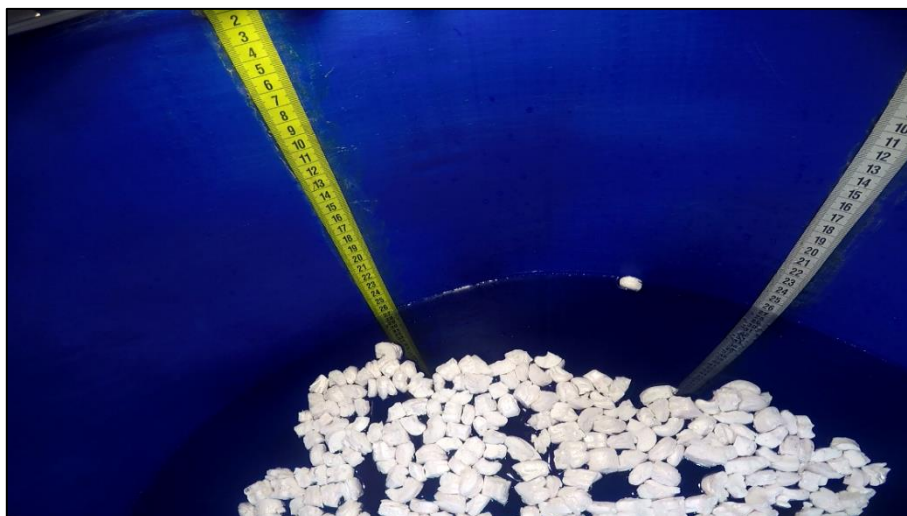


Figura 9.2. Captura extraída del video grabado por la cámara GP2, dirección 150° con respecto al eje X.

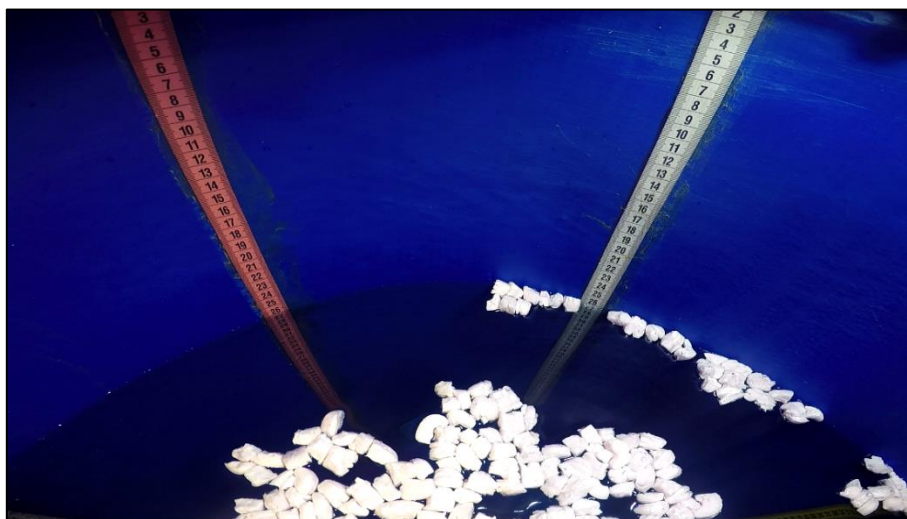


Figura 9.3. Captura extraída del video grabado por la cámara GP3, dirección 270° con respecto al eje X.

Tabla 9.1. Lectura de huincha métrica, cálculo de altura de ola y el parámetro d .

h_{agua} (cm)	Excitación	h_{huincha} (cm)	Lectura _{máx} (cm)	H_{ola} (cm)	d (cm)
46	AS692	85	≈ 27	58	≈ 12
59	AS692	85	≈ 11	74	≈ 15
73,5	AS692	85	≈ -2	87	$\approx 13,5$
59	AF691	85	≈ -5	90	31

Las Figura 9.4 y Figura 9.5 muestran ejemplos representativos de la altura de ola de agua formada al aplicar las excitaciones basales AS692 y AF691, respectivamente, para una altura inicial de agua en reposo de 59,0 cm. Es de esta forma como se adquieren las lecturas para los demás casos.



Figura 9.4. Lectura máxima de ola en huincha métrica (11 cm), registro AS692, $h_i = 59 \text{ cm}$.



Figura 9.5. Lectura máxima de ola en huincha métrica (-5 cm), registro AF691, $h_i = 59 \text{ cm}$.

Notar que la Figura 9.5 no alcanza a mostrar la altura máxima de ola, pero en el video se distingue, posteriormente a esta captura, como caen un par de gotas en caída libre por la orilla del estanque, se deduce entonces que el agua alcanza a tocar la superficie de acrílico la cual está a una cota de 90 cm (-5 cm con respecto a las lecturas que ofrece la huincha métrica) desde la base del estanque.

9.1.2. Medición de volúmenes de agua

Para los ensayos dinámicos que involucran apertura de válvula, se graba el medidor A, que se encuentra aguas abajo, cuando se lleva a cabo el ensayo n° 12 (a12vaciado731), con el fin de conocer el volumen de agua que se almacena en el interior del estanque principal en todo momento, de esta forma es posible obtener cualquier volumen asociado a una altura en el tiempo. Luego, los registros de respuesta a distintas alturas de agua al interior y distintos tiempos de vaciado, pueden ser sincronizados y comparados.

El set de imágenes de la Figura 9.6 muestra cómo se obtiene la lectura de volumen y su tiempo asociado.

En consecuencia, se construye la Tabla 9.2 que muestra el tiempo relativo de determinadas alturas de agua cuando el estanque es vaciado.

Tabla 9.2. Relación de la altura de agua y su tiempo correspondiente, obtenida experimentalmente.

H_{agua} (cm)	Volumen (Its)	ΔV (Its)	Lectura en medidor (m^3)	Tiempo captado en video (s)	Tiempo relativo (s)
73,1	186,05	-	57,06260	19	0
68,3	177,00	9,05	57,07165	52	33
62,3	161,00	16	57,08765	111	92
60,1	154,70	6,3	57,09395	128	109
55,9	144,40	10,3	57,10425	158	139
50,3	128,60	15,8	57,12005	205	186
46,0	118,50	10,1	57,13015	236	217
40,5	103,00	15,5	57,14565	287	268
33,8	86,40	16,6	57,16225	346	327
31,5	79,45	6,95	57,16920	372	353
23,0	57,75	21,7	57,19090	459	440
20,2	49,50	8,25	57,19915	495	476
13,7	33,75	15,75	57,21490	573	554

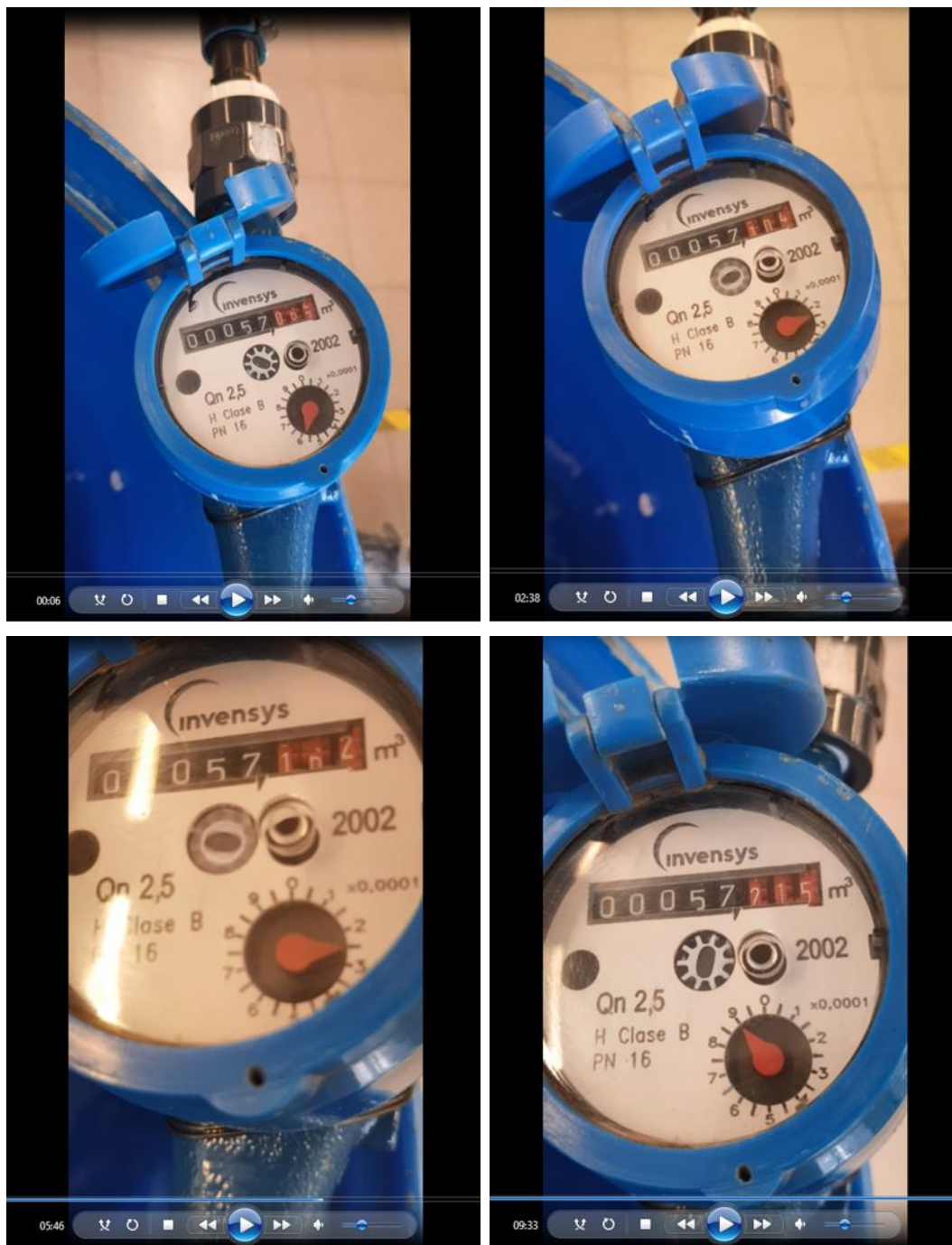


Figura 9.6. Lecturas de volúmenes asociadas a alturas de agua determinadas al interior del estanque principal y su correspondiente medición del tiempo.

9.2. Anexo B: Mesa vibradora (Moog Inc., 2008)

La información que se requiere para comprender el funcionamiento de la mesa vibradora se obtiene por medio de una traducción del documento *MOOG 6DOF200E MOTION SYSTEM USER'S MANUAL*.

9.2.1. Descripción general del sistema

MOOG 6DOF2000E modelo 170-131 es un sistema de movimiento eléctrico de seis grados de libertad (6 GDL) con un bastidor metálico suspendido horizontal para el montaje de carga útil, ver Figura 9.7. Cada movimiento base es un sistema autónomo. Contienen su propio sistema de alimentación, servo-controles, monitores de seguridad, protección contra sobrecargas, opción de bloqueo, secuencia de arranque y control definido por el usuario.

9.2.2. Movimientos mecánicos

El movimiento del sistema se realiza utilizando seis actuadores electromecánicos idénticos.

Cada actuador incorpora un servomotor de alto rendimiento, husillo de bola de baja fricción, interruptores y amortiguación al final de cada arranque.

Un extremo de cada actuador está unido al bastidor base, que está anclado al piso. Cada punto de fijación contiene una horquilla giratoria que proporciona un punto de pivote para el actuador. El otro extremo de cada actuador está unido a una horquilla giratoria asegurada al marco basal de la mesa vibradora. Lo anterior se detalla en la Figura 9.7.

El movimiento lineal controlado de los actuadores da como resultado los siguientes seis tipos de movimiento de la plataforma metálica (se hace referencia al estar sentado en la plataforma por la parte frontal mirando hacia adelante), ver Figura 9.7:

- Pitch – Rotación hacia delante y hacia atrás (orientación positiva es nariz de mesa arriba, cola abajo).
- Roll – Rotación hacia la izquierda y hacia la derecha (orientación positiva es el lado izquierdo hacia arriba, el lado derecho abajo).
- Yaw – Rotación hacia la derecha y hacia la izquierda (orientación positiva es en el sentido de las manecillas del reloj viendo desde la parte superior, con la parte frontal de la mesa apuntando a las 6 hrs).
- Heave – Movimiento vertical hacia arriba y hacia abajo (sentido positivo hacia abajo).
- Surge – Movimiento horizontal hacia delante y hacia atrás (sentido positivo hacia adelante).

- Lateral – Movimiento horizontal hacia la izquierda y hacia la derecha (sentido positivo es hacia la derecha).

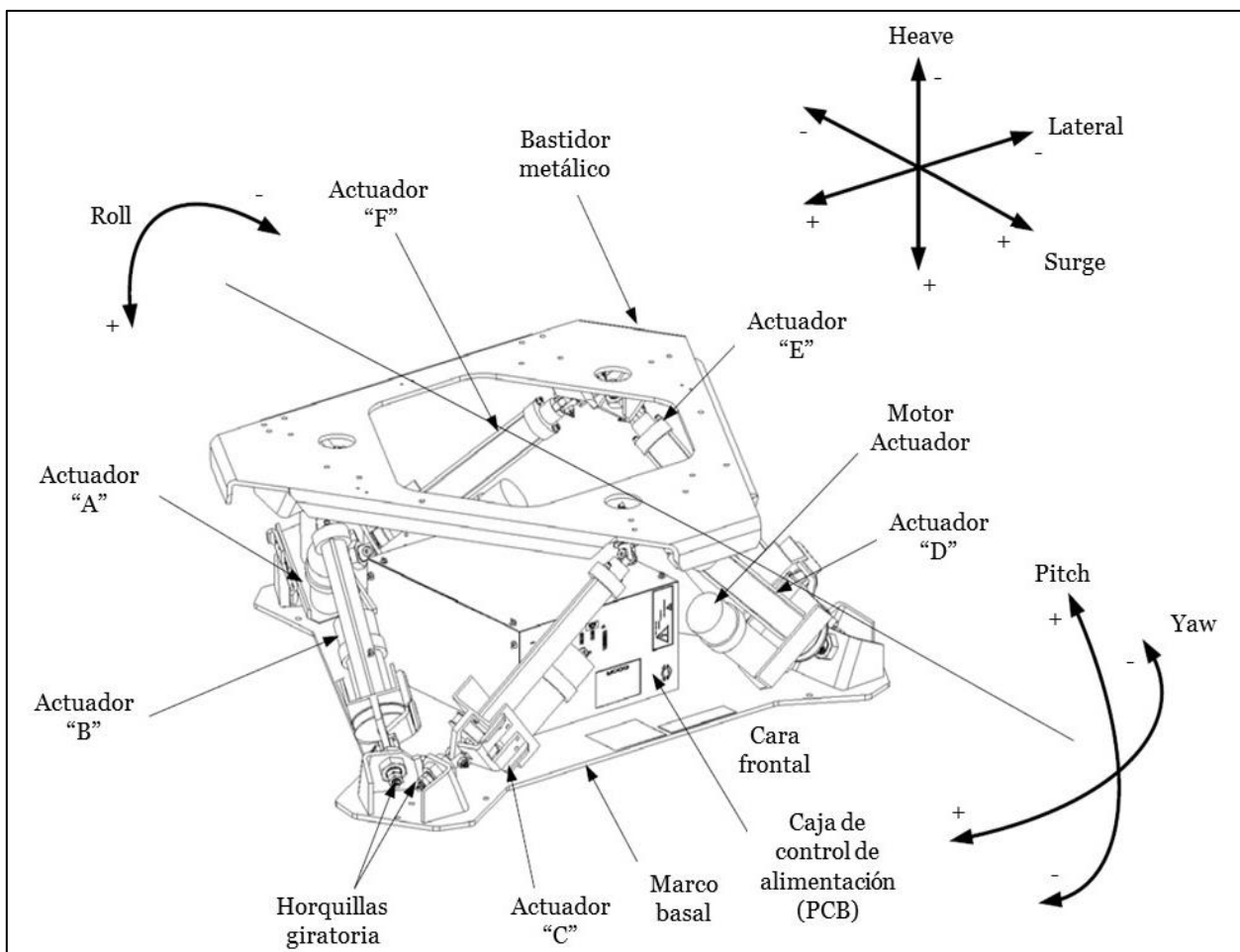


Figura 9.7. Mesa vibradora. Moog 6DOF200E Motion System. Fuente: (Moog Inc., 2008).

Luego, homologando algunos grados de libertad a ejes cartesianos, se tiene la configuración de ejes mostrados en la Figura 9.8, la cual se utiliza como referencia para llevar a cabo de instrumentación, cálculos, etc.

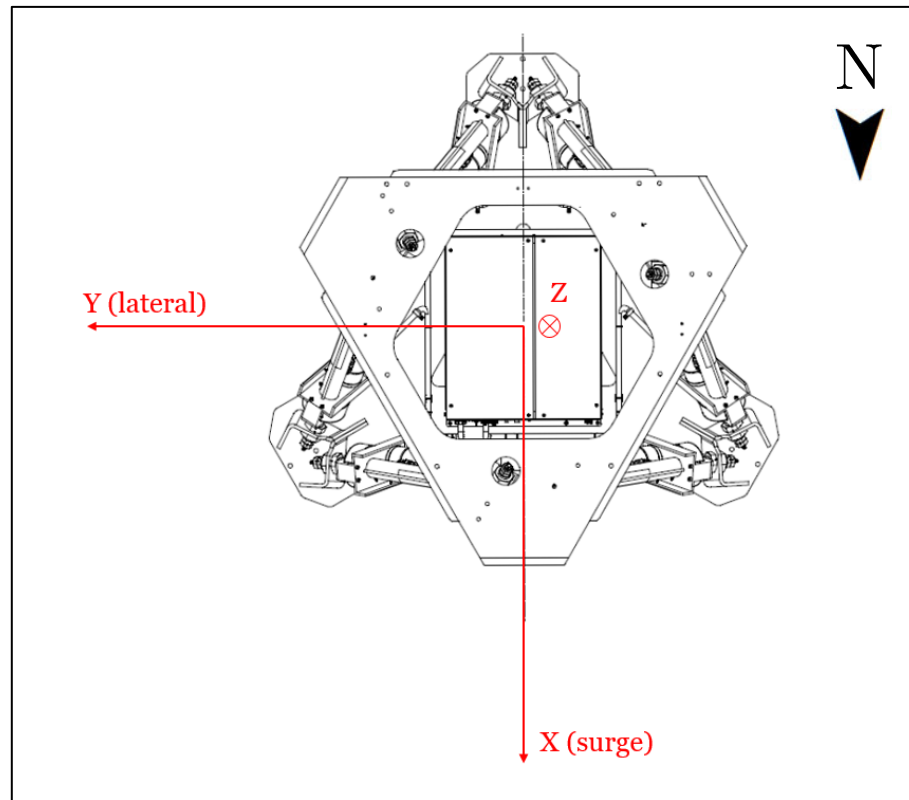


Figura 9.8. Ejes cartesianos mesa vibradora.

Fuente: (Moog Inc., 2008).

9.2.3. Control de movimientos electrónicos

El sistema electrónico que controla el movimiento se encuentra al interior de la caja de control de alimentación (Power Control Box, PCB) según Figura 9.7. Los contenidos del PCB están separados en dos secciones. Una sección contiene la base de movimientos y los circuitos lógicos. En la otra sección se encuentran la fuente de alimentación del motor de alta corriente y los controladores del motor.

La posición del actuador es controlada por una computadora (Motion Base Computer, MBC). Esta contiene el software de control, que permite el funcionamiento de sistema de movimiento, así como también ayuda en el diagnóstico de fallas. La MBC proporciona el control de los actuadores en respuesta a los comandos del sistema de control del usuario.

En particular, la mesa vibradora instalada en el laboratorio de sólidos en las dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de Universidad de Chile tiene alojado su PCB junto al sistema MBC, ver Figura 9.9.

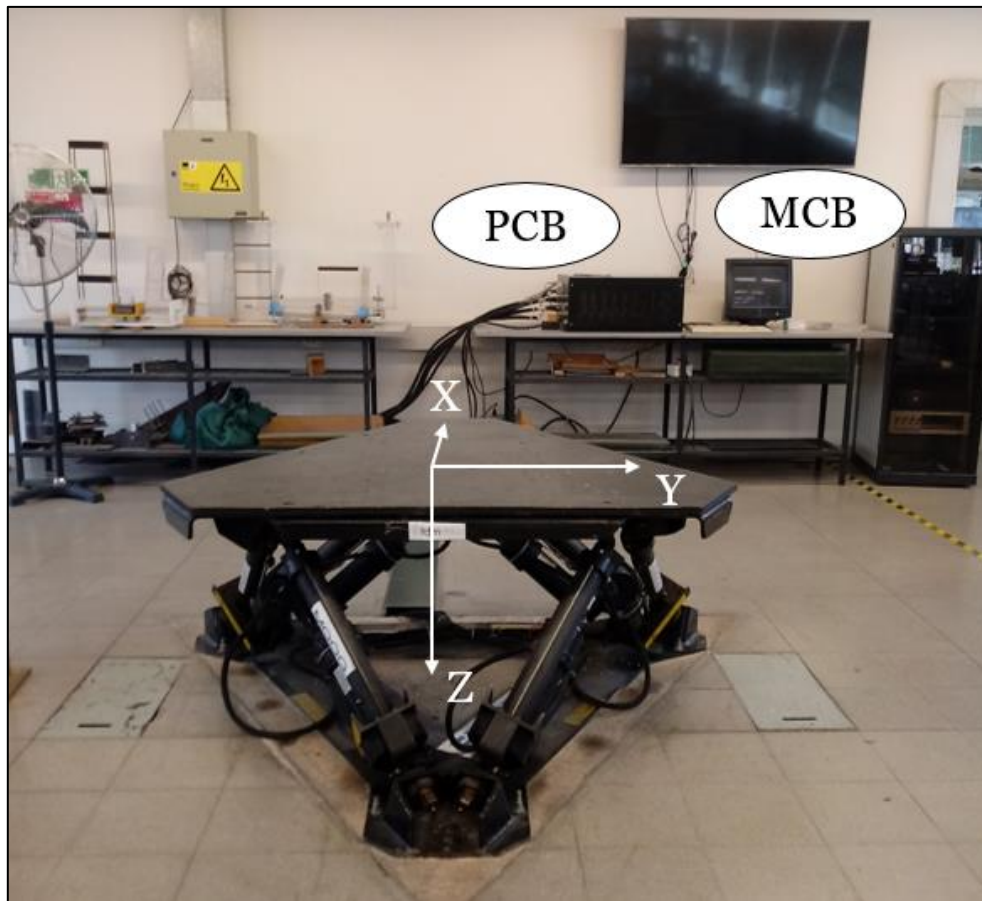


Figura 9.9. Mesa vibradora en laboratorio.

9.2.4. Traspaso de información

La comunicación desde y hacia la parte electrónica de control de la mesa al controlador del sistema se puede realizar a través de conexión Ethernet o RS 485 Serial Interfaz. Ambas interfaces ofrecen opciones de almacenamiento y conexión en tiempo real.

9.2.5. Operación

La posición de reposo de la plataforma es llamada la posición de inicio y está a una distancia de 71,5 cm del piso. Esta es la posición donde la masa que se coloca sobre la mesa puede ser cargada y descargada de manera segura. Cuando todas las funciones de seguridad y los interbloques están en el estado correcto, el controlador del sistema del usuario puede iniciar la base de movimiento utilizando los comandos ENGAGE o START. Luego el sistema se mueve a una posición ENGAGE, esta es la posición desde la cual comienza el movimiento y la plataforma llega a una altura de 94,5 cm. Al recibir el comando PARK del controlador del sistema, la base de movimiento vuelve suavemente a la posición de inicio.

9.2.6. Visualización de la información del sistema de control de movimientos

La base de movimiento de la mesa no se suministra con un monitor de computadora o teclado, aunque es recomendable que el usuario conecte estos dispositivos periféricos. Se puede usar para actualizar el software, descargar archivos de registro y solucionar problemas del sistema.

La siguiente información se proporciona en la pantalla, entre otras, ver Figura 9.10. Display de información en pantalla:

- Mensajes de error
- Mensajes de estado del sistema
- Monitores de proceso
- Comando de actuador o grado de libertad (%)
- Retroalimentación del actuador (%)
- Inputs/Outputs discretos
- Identificación de software
- Estado de la base
- Cuadro de “Latched Faults”.

Si la base de movimiento no se activa, el cuadro “Mensajes de error” indicará el motivo. Una vez que la base esté activada, cualquier falla que cause que la base se detenga anticipadamente, se muestra en rojo en el área de visualización de “Latched Faults”, ver Figura 9.10.

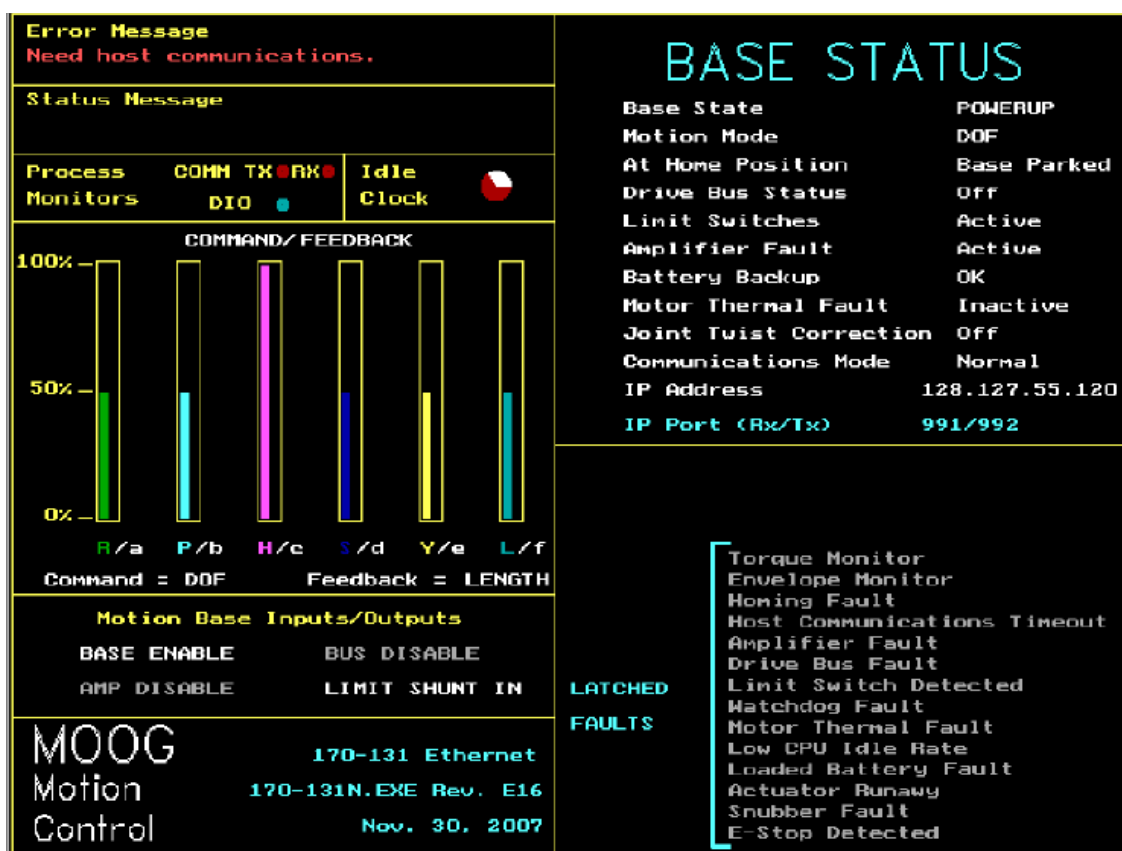


Figura 9.10. Display de información en pantalla.

Fuente: (Moog Inc., 2008).

9.2.7. Valores límites de movimiento

En la Tabla 9.3 se muestran los valores máximos de cada grado de libertad que puede reproducir la mesa vibradora.

Tabla 9.3. Valores límites de movimiento de la mesa vibradora

GDL	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración
Pitch	±22 grados	±30 grados/s	±500 grados/s ²
Roll	±21 grados	±30 grados/s	±500 grados/s ²
Yaw	±22 grados	±40 grados/s	±400 grados/s ²
Heave	±18 cm	±30 cm/s	±0,5 g
Surge	±25 cm	±50 cm/s	±0,6 g
Lateral	±25 cm	±50 cm/s	±0,6 g

Fuente: (Moog Inc., 2008).

9.3. Anexo C: Normas de diseño sísmico de estanques de almacenamiento

En 1935 se establece por primera vez una norma para el diseño de estanques de acero en el Journal AWWA EEUU (American Water Works Association), pero no incluía disposiciones para sismos. A principios de 1960, Housner (1963) realiza análisis sobre el comportamiento dinámico de estanques de almacenamiento de agua para la industria de energía nuclear.

En 1984 la norma AWWA D100, Standar for Welded Steel Tanks for Water Storage, incluye por primera vez disposiciones para el diseño sísmico de estanques de almacenamiento de fluidos.

La norma AWWA D100, permitió calcular estanques de acero soldado para almacenamiento de agua, ya sea potable o de procesos, que trabajen a presión atmosférica y que no necesiten servicio de refrigeración. El uso de esta norma permite calcular estanques de fondo plano apoyados en el suelo, y estanques elevados sobre una torre estructural.

En 1991, el UBC (Uniform Building Code, EEUU), incluye requisitos para el diseño de estanques que en algunos casos sus disposiciones son más conservadoras que la norma AWWA D100.

Uno de los procedimientos de diseño sísmico más recurrente para estanques de almacenamiento de fluidos, es el modelo mecánico propuesto por G. W. Housner (1963) para estanques de paredes rígida, donde simplifica el estudio considerando una masa móvil (convectiva) rigidizada por un resorte y una masa fija (impulsiva), planteando ecuaciones para encontrar el valor de tales masas, sus respectivas alturas desde la base del estanque, y la rigidez del resorte equivalente que actúa junto a la masa convectiva.

S. Hernández (2007) en su trabajo de título estipula que “en muchas de las normas que se encuentran vigentes se nombra la experiencia chilena durante el terremoto de 1960, el cual originó una gran cantidad de fallas en estanques de almacenamiento de agua potable. Aunque Chile cuenta con este antecedente, no existen muchos estudios al respecto de nuestro país. Haciendo referencia en el punto 11.8 de la NCh 2369 Of 2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, que este tipo de estructuras se debe diseñar apoyándose en las normas API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage y la Seismic Design of Storage Tanks de la New Zeland Nacional Society for Earthquake Engineering en conjunto con New Zealand Standard 4203.” (S. Hernández, 2007). También se mencionan AWWA-D 100 Standard for Welded Steel Tanks for Water Storage, AWWA-D 110 Wire and Strand Wound Circular, Prestressed Concrete Water Tanks, AWWA-D 115 Circular

Prestressed Concrete Water Tanks with Circunferential Tendons, ACI 350.3 Practice for the Seismic Design of Liquid Containing Structures.

A continuación, se hace una breve descripción de los códigos de diseño para estanques de almacenamiento habitualmente usados en Chile.

9.3.1. API 650 “Welded Steel tanks for oil storage”

La American Petroleum Institute es la principal asociación comercial de los Estados Unidos que representa a unas 400 corporaciones implicadas en la producción, refinamiento, distribución, construcción y otros aspectos que abarca la industria del petróleo y gas.

El código API 650 establece los requisitos mínimos para los materiales, diseño, fabricación, montaje, requerimientos de medición y pruebas, para estanques de almacenamiento de acero, soldados, con diferentes capacidades y techo abierto o cerrado, para presión interna aproximada a la atmosférica, aunque se permiten presiones internas más altas cuando se cumplen requerimientos adicionales. Esta norma es aplicable solamente en estanques cuyo fondo este uniformemente apoyado, que no necesiten servicio de refrigerado que tenga una temperatura máxima de diseño de 93° C (220° F).

El código está diseñado para construir estanques con una adecuada seguridad y costos razonables, para el almacenamiento de petróleo. Sin embargo, es aplicable para almacenamiento de productos químicos, líquidos industriales, agua, etc. No establece tamaños específicos de estanques, por el contrario, se puede escoger cualquier dimensión que cumplan con los requisitos mínimos.

Esta norma cuenta con 22 apéndices, los cuales cubren diferentes aspectos del diseño y construcción de los estanques. Para efecto de lo que se desea estudiar en esta memoria, se utiliza el Apéndice E: “Diseño sísmico de estanques de almacenamiento”, cuyas ecuaciones se presentan en el Capítulo 2.

9.3.2. ACI 350 “Seismic Design of Liquid Containing Concrete Structures”

American Concrete Institute (ACI) con la norma ACI 350.3 realiza un aporte relativamente reciente que suministra una guía sumamente útil para llevar a cabo el análisis sísmico de las estructuras de los estanques de almacenamiento o depósitos de concreto reforzado.

Está dirigida a la obtención de las fuerzas y presiones que actúan sobre un estanque durante un sismo, así como los elementos mecánicos, esfuerzos y deformaciones que tienen lugar en la estructura a causa de dichas fuerzas sísmicas. Los valores de estas se calculan

correspondiendo a las características estructurales del depósito, del sitio y la condiciones del terreno donde se construye la estructura.

En el capítulo 9 de la ACI 350.3 se definen las características dinámicas de los estanques que contienen líquidos.

El modelo matemático que utiliza esta norma se basa en el propuesto por Housner (1963). Las ecuaciones se muestran en el Capítulo 2.

9.4. Anexo D: Cálculo de período convectivo e impulsivo mediante método de Housner y Normas

9.4.1. Método de Housner (1963): modelo dinámico de estanques

Anterior a realizar los ensayos, se analizan las propiedades dinámicas de la estructura con la teoría propuesta por G. W. Housner descrita en el Capítulo 2.

En la Tabla 9.4 se presenta el cómputo del periodo asociado al modo convectivo conforme al modelo mecánico de Housner para el estanque principal de almacenamiento asociado a diversos niveles de agua.

Tabla 9.4. Cálculo de los parámetros del modelo mecánico de Housner.

h (cm)	M (kg)	M_o (kg)	M_1 (kg)	k_1 (kg/s ²)	h_o (cm)	h_1 (cm)	T_θ (s)	f (Hz)
80,3	201,95	179,90	24,31	1480	33	64	0,81	1,242
75,6	192,00	168,73	24,55	1494	34	59	0,81	1,242
73,5	187,53	163,69	24,66	1501	34	57	0,81	1,242
73,1	186,05	162,18	24,60	1497	34	56	0,81	1,242
68,3	177,00	151,55	25,04	1524	35	51	0,81	1,242
62,3	161,00	134,11	24,96	1518	36	45	0,81	1,241
60,1	154,70	127,34	24,85	1512	36	42	0,81	1,241
59,0	149,85	122,57	24,52	1491	36	41	0,81	1,241
55,9	144,40	115,82	24,92	1515	37	38	0,81	1,241

Notar que los parámetros del modelo mecánico de Housner de la Tabla 9.4, son calculados hasta una altura de agua al interior del estanque principal de 55,9 cm, esto es debido a que para alturas menores se obtienen resultados incoherentes.

El período asociado al modo convectivo T_θ , y la frecuencia f , caracterizan el comportamiento superficial del líquido definiendo el período natural que describe la ola (sloshing) que se genera durante una excitación basal.

La altura de la cresta de ola al interior del estanque d , Ecuación (2.7), se calcula a partir de la amplitud A_1 , la cual según la Ecuación (2.8) corresponde al valor obtenido en el espectro elástico de desplazamiento de la estructura S_d , asociada al periodo del modo convectivo. De las Figura 9.11, Figura 9.12, Figura 9.13 y Figura 9.14 se obtienen los espectros de desplazamiento para el período mostrado en la Tabla 9.4 y los resultados se presentan en las Tabla 9.60 y Tabla 9.6 correspondiente al registro de aceleraciones aleatorias suave en dos direcciones (AS692) y el fuerte en dos direcciones (AF691), respectivamente. Lo anterior se realiza para tres razones de amortiguamiento. Los outputs

utilizados corresponden a las mediciones realizadas con los acelerómetros A11 y A12 durante los ensayos a12vaciado731 y a21vaciado623.

Tabla 9.5. Espectro elástico de desplazamiento, excitación basal AS692.

$T_\omega (s)$	$A_{1_x} = S_{d_x} \text{ (cm)}$			$A_{1_y} = S_{d_y} \text{ (cm)}$		
	$\beta = 1\%$	$\beta = 3\%$	$\beta = 5\%$	$\beta = 1\%$	$\beta = 3\%$	$\beta = 5\%$
0,81	3,67	2,03	1,64	5,24	5,15	4,77

Tabla 9.6. Espectro elástico de desplazamiento, excitación basal AF691.

$T_\omega (s)$	$A_{1_x} = S_{d_x} \text{ (cm)}$			$A_{1_y} = S_{d_y} \text{ (cm)}$		
	$\beta = 1\%$	$\beta = 3\%$	$\beta = 5\%$	$\beta = 1\%$	$\beta = 3\%$	$\beta = 5\%$
0,81	6,27	3,95	3,16	7,36	4,38	3,78

Luego, se obtiene la altura de la cresta de ola d , provocada por los sismos en dos direcciones AS692 y AF691. Aquellos resultados se muestran en las Tabla 9.7 y Tabla 9.8, respectivamente.

Los resultados del modelo mecánico de Housner permiten obtener una noción de la altura máxima de llenado, para cuando el estanque es sometido a los ensayos dinámicos. Se establece así, una cota máxima de altura de agua de 75 cm y 67,5 cm cuando el estanque es sometido a los sismos AS692 y AF691, respectivamente.

Tabla 9.7. Altura de cresta de ola d , excitación basal AS692.

$h \text{ (cm)}$	$d \text{ (cm)}$		
	$\beta = 1\%$	$\beta = 3\%$	$\beta = 5\%$
80,3	11,82	11,43	9,89
75,6	11,82	11,42	9,88
73,5	11,82	11,42	9,88
73,1	11,82	11,42	9,88
68,3	11,81	11,42	9,88
62,3	11,80	11,40	9,87
60,1	11,79	11,39	9,86
59,0	11,78	11,39	9,85
55,9	11,76	11,37	9,84

Tabla 9.8. Altura de cresta de ola d , excitación basal AF691.

h (cm)	d (cm)		
	$\beta = 1\%$	$\beta = 3\%$	$\beta = 5\%$
80,3	27,71	8,50	6,69
75,6	27,70	8,50	6,68
73,5	27,69	8,50	6,68
73,1	27,69	8,50	6,68
68,3	27,66	8,50	6,68
62,3	27,59	8,49	6,67
60,1	27,54	8,48	6,67
59,0	27,54	8,48	6,67
55,9	27,42	8,46	6,66

En el Anexo A, se muestran imágenes del interior del estanque con las alturas máximas de ola, captadas por las cámaras de video GoPro, para los ensayos dinámicos que no contemplan vaciado. Aquellos datos se presentan junto a los resultados del modelo de Housner para $\beta = 1\%$ en la Tabla 9.9 con el fin de establecer una comparación. Se observa que la NCh 2369.of2003 en el punto 11.8.8 sugiere emplear un $\beta = 0.5\%$.

Tabla 9.9. Comparación del parámetro d entre método de Housner y resultados experimentales.

h (cm)	<i>Sismo</i>	$d_{Housner}$ (cm)	$d_{experimental}$ (cm)	<i>Diferencia</i>
46	AS692	11,60	≈ 12	3,33%
59	AS692	11,78	≈ 15	21,47%
73,5	AS692	11,82	$\approx 13,5$	12,44%
59	AF691	27,54	≈ 31	11,16%

Notar que los parámetros $d_{Housner}$ y $d_{experimental}$ de la tabla corresponde al máximo obtenido independiente de la dirección del sismo, pero no del tipo de sismo.

Notar que no se muestran los resultados de los sismos de constitución y concepción, esto es debido a que se observó que la altura de ola producida por ellos sobrepasaba con facilidad las paredes del estanque.

La teoría proporcionada por Housner se enfoca principalmente en analizar el modo convectivo de la estructura y dados los resultados que se obtienen, se concluye que el método entrega una aceptable aproximación de la altura de ola con respecto a lo obtenido experimentalmente.

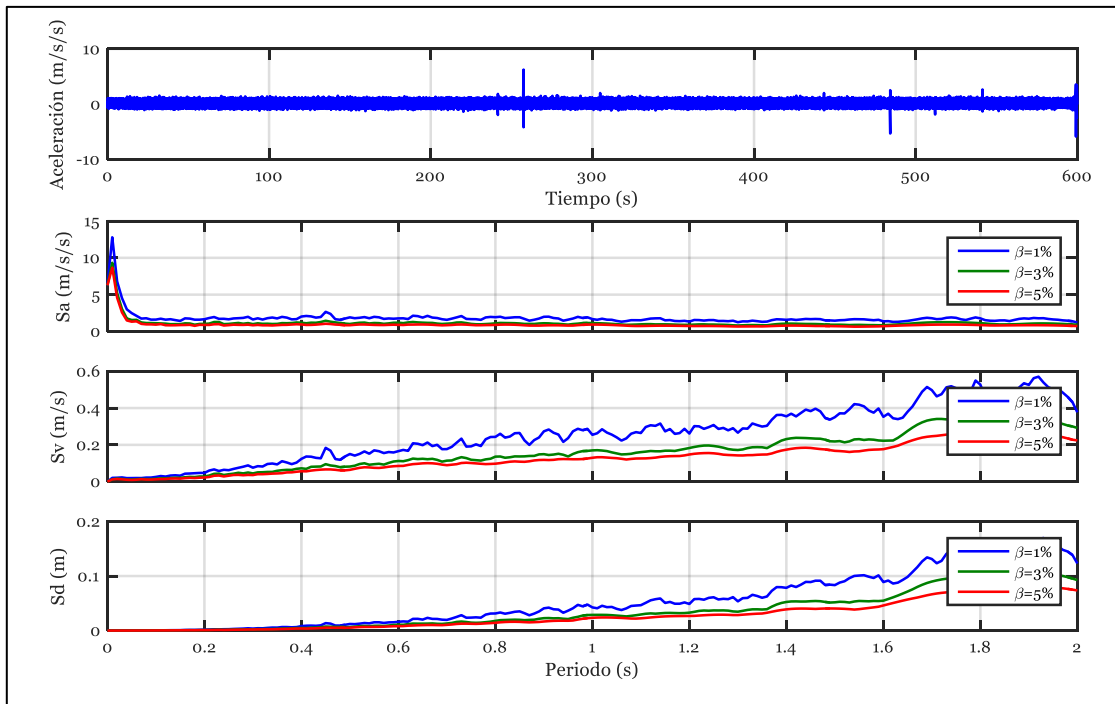


Figura 9.11. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AS692, dirección X.

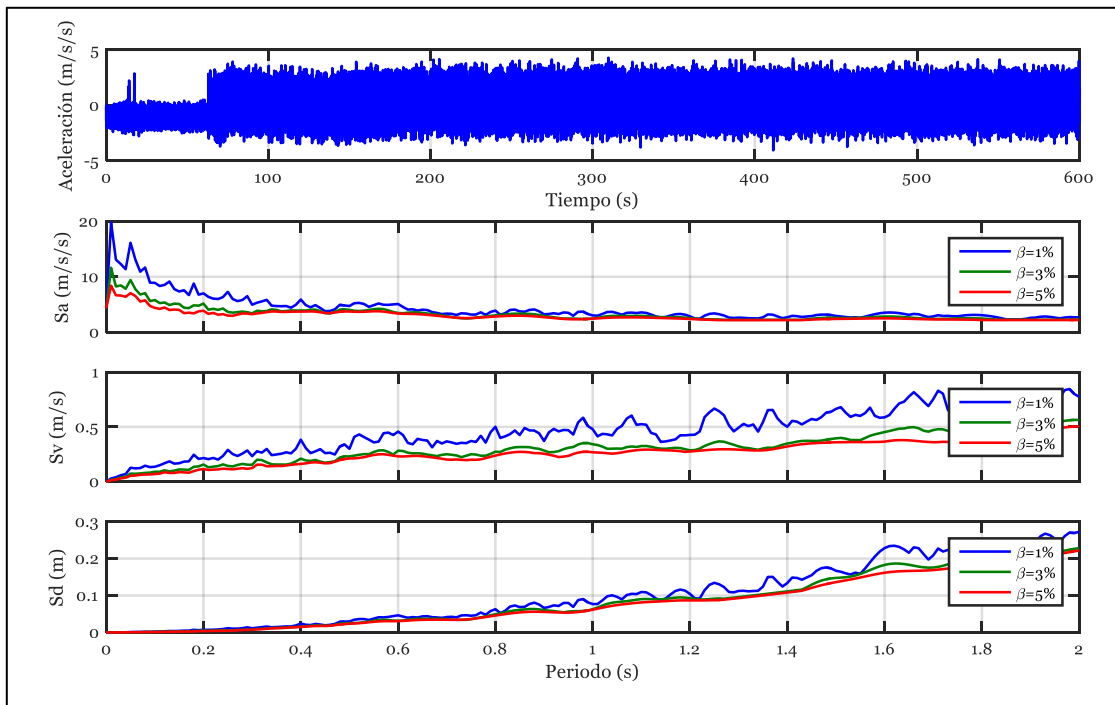


Figura 9.12. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AS692, dirección Y.

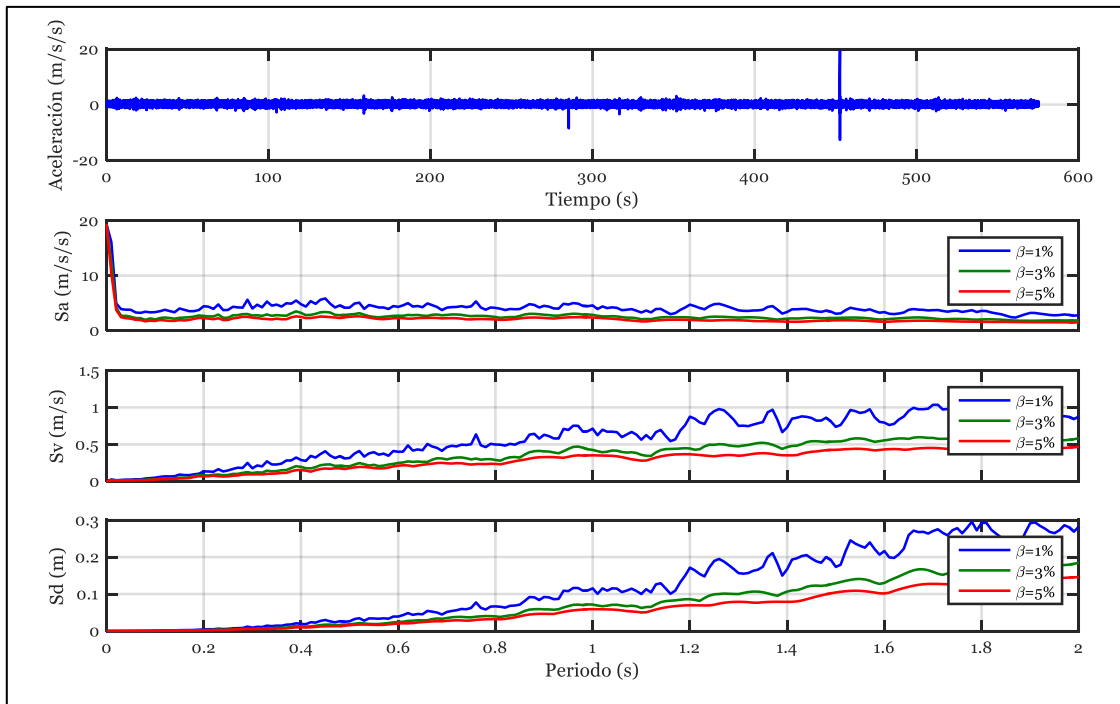


Figura 9.13. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AF691, dirección X.

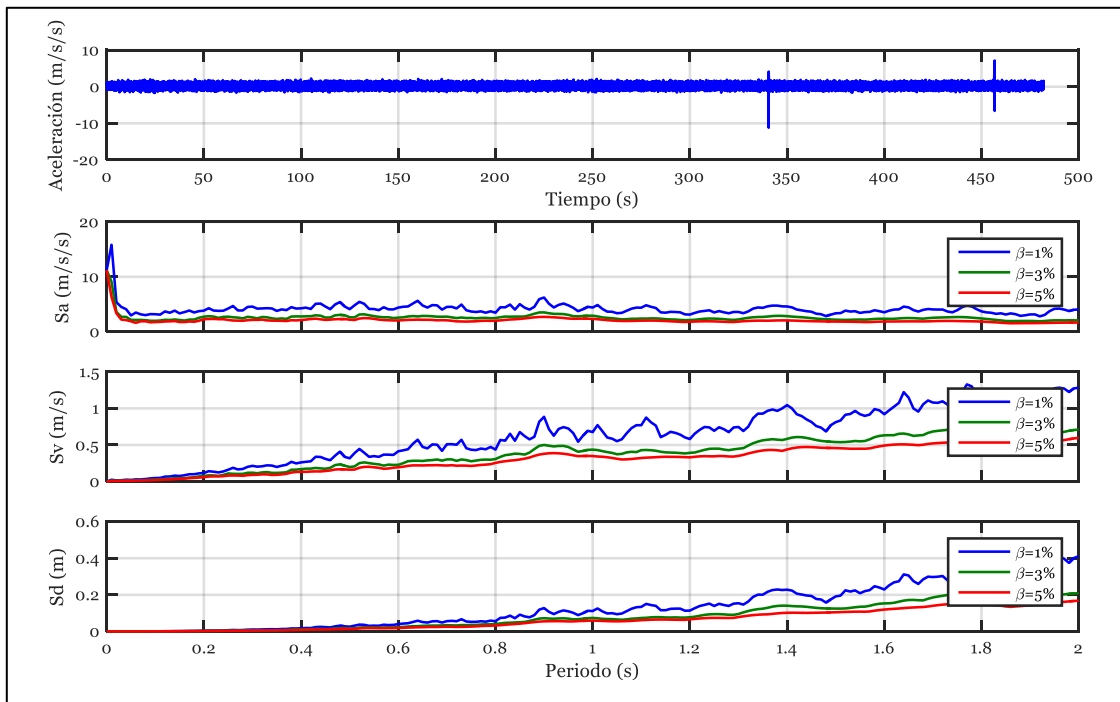


Figura 9.14. Espectro elástico de respuesta, excitación basal AF691, dirección Y.

9.4.2. Resultados a partir de métodos descritos en las normas internacionales

La norma API 650 utiliza una adaptación del modelo mecánico de Housner para diseñar las estructuras de estanques de almacenamiento.

La Tabla 9.10 muestra los resultados obtenidos al calcular los parámetros dinámicos del estanque en estudio, con dicha norma.

Tabla 9.10. Parámetros dinámicos obtenidos con la norma API 650.

H (m)	H / D	C_i	Modo Impulsivo		Modo Convectivo		
			T_i (s)	f_i (Hz)	K_s	T_c (s)	f_c (Hz)
0,803	1,38	6,80	0,048	20,83	0,578	0,79	1,262
0,756	1,30	6,65	0,044	22,62	0,578	0,79	1,262
0,735	1,27	6,60	0,043	23,44	0,578	0,79	1,262
0,731	1,26	6,58	0,042	23,64	0,578	0,79	1,262
0,683	1,18	6,30	0,038	26,43	0,578	0,79	1,262
0,623	1,07	6,28	0,034	29,06	0,578	0,79	1,262
0,601	1,04	6,25	0,033	30,27	0,578	0,79	1,261
0,559	0,96	6,16	0,030	33,02	0,578	0,79	1,261
0,503	0,87	6,09	0,027	37,12	0,579	0,79	1,260
0,46	0,79	6,06	0,025	40,79	0,580	0,79	1,258
0,405	0,70	6,10	0,022	46,03	0,581	0,80	1,255
0,338	0,58	6,19	0,018	54,35	0,586	0,80	1,245
0,315	0,54	6,28	0,017	57,48	0,589	0,81	1,239
0,230	0,40	6,57	0,013	75,25	0,610	0,84	1,196
0,202	0,35	6,95	0,012	81,00	0,624	0,86	1,168
0,137	0,24	7,80	0,009	106,41	0,690	0,95	1,057

Para una mejor representación de datos, los resultados de la Tabla 9.10 se muestran en el gráfico de la Figura 9.15, donde se aprecia que el modo impulsivo aumenta su frecuencia mientras disminuye la altura de agua al interior del estanque, mientras que el modo convectivo alcanza un máximo de 1,262 Hz.

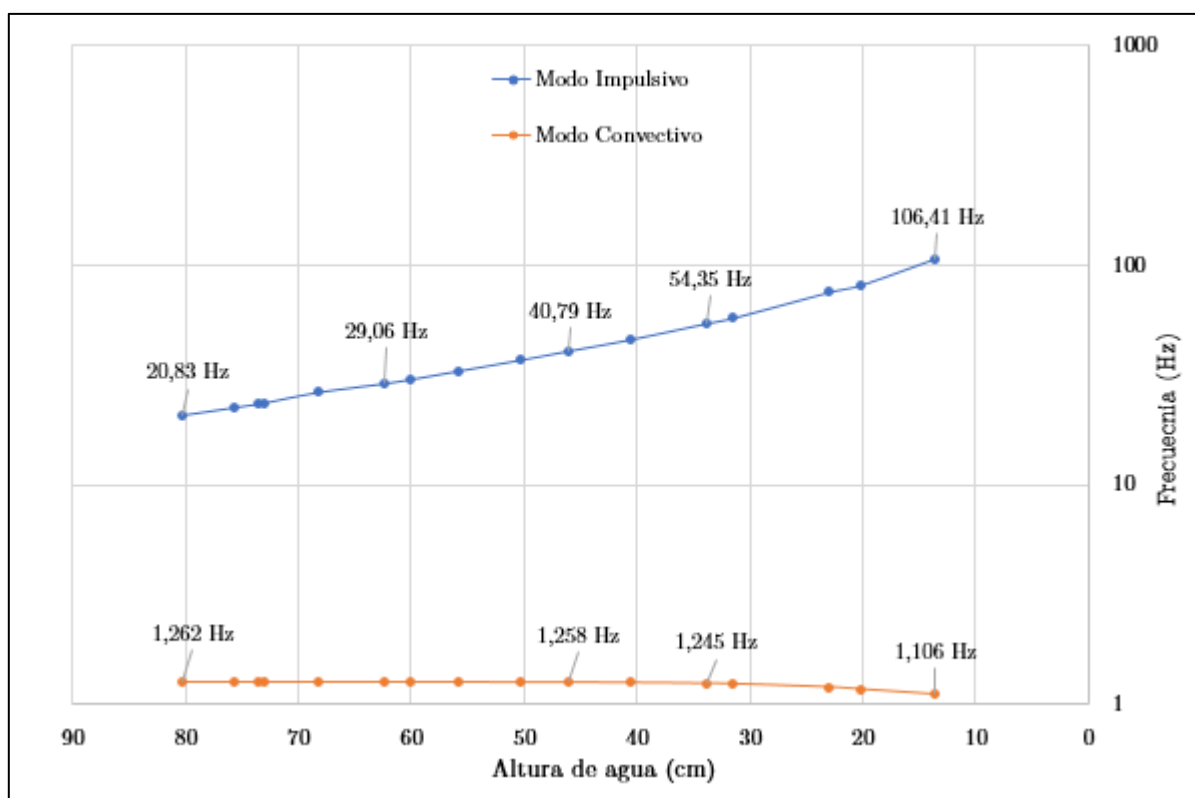


Figura 9.15. Frecuencias identificadas en función de la altura de agua asociadas al modo convectivo y al modo impulsivo.

Se intenta establecer una comparación con la norma ACI 350, pero sus resultados no son aceptables para el caso de un estanque de HDPE. En este contexto, se destaca que la orientación de la norma ACI se refiere a estanques de grandes dimensiones de hormigón armado y sus parámetros están normalizados para aquel tipo de material, por lo tanto, es infructuoso el cálculo de propiedades dinámicas, para la estructura en estudio, con aquel documento.

Por otra parte, estableciendo una comparación de las frecuencias del modo convectivo obtenidas con el modelo mecánico de Housner y la norma API 650, se aprecia que difieren en 0,02 Hz. Además, utilizando la norma es posible calcular la frecuencia del modo para alturas menores de agua al interior del estanque, a diferencia de Housner.

9.5. Anexo E: Identificación de propiedades dinámicas mediante métodos de identificación de sistemas

9.5.1. Identificación de propiedades dinámicas a partir de ensayos de impacto a través del método de Ibrahim en el dominio del tiempo (ITD)

En las siguientes tablas se muestran el resultado al aplicar el método ITD a los registros de respuesta de los ensayos de impacto.

Del procesamiento de datos, cabe destacar, que se utilizó un filtro pasa alto de 0,25 Hz y un filtro pasa bajo de 100 Hz.

Para obtener la frecuencia asociada a un cierto nivel de altura de agua, se promedian aquellas frecuencias que poseen igual o similar forma modal obtenida con el método.

La primera forma modal identificada, presenta una repetitividad en los 3 primeros golpes del ensayo de impacto, que se suministran según dirección señalada en 5.4.1.

La segunda forma modal identificada, presenta una repetitividad en los siguientes 3 golpes del ensayo de impacto.

Por otra parte, para los impactos en la zona 3, existe una aleatoriedad en cuanto a la primera forma modal identificada.

9.5.1.1. Configuración A de sensores

9.5.1.1.1. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 13,7 \text{ cm}$ Tabla 9.11. Altura de agua $h = 13,7 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a13pullback137.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	17,60	3,27	17,80	2,59	17,87	2,61	17,76	2,82	0,14	0,39	0,79	13,83
2	18,76	2,75	19,29	1,63	18,93	2,7	18,99	2,36	0,27	0,63	1,42	26,69
3	45,75	2,40	46,77	4,73	N.I	N.I	46,26	3,57	0,72	1,65	1,56	46,22
4	69,81	1,52	N.I	N.I	69,99	1,78	69,90	1,65	0,13	0,18	0,19	10,91
5	82,63	2,24	82,81	2,11	82,52	2,47	82,65	2,27	0,15	0,18	0,18	7,93
6	86,47	2,35	86,68	2,37	86,82	2,09	86,65	2,27	0,18	0,16	0,21	7,05

Tabla 9.12. Altura de agua $h = 13,7 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a13pullback137.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,39	2,43	18,21	3,23	18,58	3,39	18,39	3,02	0,18	0,51	0,98	16,89
2	19,08	1,99	19,04	2,27	19,05	1,47	19,06	1,91	0,02	0,41	0,10	21,47
3	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
4	70,91	0,94	70,49	0,96	70,25	1,65	70,55	1,18	0,33	0,40	0,47	33,90
5	82,68	2,95	82,05	2,86	84,37	2,75	82,80	2,85	0,40	0,10	0,48	3,51
6	85,38	2,00	85,82	2,07	85,38	1,48	85,53	1,85	0,26	0,32	0,30	17,30

Tabla 9.13. Altura de agua $h = 13,7 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a13pullback137.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	17,85	2,80	17,93	2,59	17,89	3,14	17,89	2,84	0,04	0,28	0,22	9,86
2	19,15	2,11	19,16	2,99	19,03	2,66	19,11	2,59	0,07	0,44	0,37	16,99
3	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
4	67,50	5,49	68,93	0,65	68,44	2,74	68,29	2,96	0,72	2,43	1,05	82,09
5	82,52	2,21	83,17	2,09	83,12	2,27	82,94	2,19	0,36	0,09	0,43	4,11
6	86,42	1,85	86,25	2,09	86,46	1,44	86,37	1,79	0,11	0,33	0,13	18,44

9.5.1.1.2. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 23,0 \text{ cm}$ Tabla 9.14. Altura de agua $h = 23,0 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a15pullback230.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	17,24	3,71	17,44	2,5	17,46	3,24	17,38	3,15	0,12	0,61	0,69	19,37
2	65,04	3,66	65,12	4,09	65,81	3,31	65,32	3,69	0,42	0,39	0,64	10,57
3	68,30	3,11	68,36	2,98	68,67	3,62	68,44	3,24	0,20	0,34	0,29	10,49
4	74,75	1,65	74,61	1,13	75,96	2,29	75,11	1,69	0,74	0,58	0,99	34,32
5	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I
6	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I

Tabla 9.15. Altura de agua $h = 23,0 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a15pullback230.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	17,62	4,53	17,85	3,03	17,70	3,59	17,72	3,72	0,11	0,76	0,62	20,43
2	65,38	3,02	65,85	1,39	65,91	1,66	65,71	2,02	0,29	0,87	0,44	43,07
3	66,13	1,44	74,02	2,39	73,95	2,63	71,37	2,15	4,53	0,63	6,35	29,30
4	72,89	2,72	79,77	2,18	80,32	2,73	77,66	2,54	4,14	0,31	5,33	12,20
5	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I
6	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I

Tabla 9.16. Altura de agua $h = 23,0 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a15pullback230.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	17,37	3,37	17,44	3,12	17,35	3,81	17,39	3,43	0,05	0,35	0,29	10,20
2	66,11	1,19	66,19	1,55	66,25	1,75	66,19	1,50	0,07	0,28	0,11	18,67
3	69,75	2,33	70,22	1,68	68,51	1,94	69,49	1,98	0,88	0,33	1,27	16,67
4	74,20	2,11	74,21	2,05	73,58	2,17	74,00	2,11	0,36	0,06	0,49	2,84
5	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I
6	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I

9.5.1.1.3. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 33,8 \text{ cm}$ Tabla 9.17. Altura de agua $h = 33,8 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a16pullback338.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,64	3,73	16,69	2,17	16,63	2,06	16,65	2,65	0,03	0,93	0,18	35,09
2	37,82	3,94	37,93	3,98	37,71	3,90	37,82	3,94	0,11	0,04	0,29	1,02
3	37,96	3,05	39,07	2,3	38,78	1,31	38,60	2,22	0,58	0,87	1,50	39,19
4	39,57	1,57	45,99	1,07	45,94	1,66	43,84	1,43	3,69	0,32	8,42	22,38
5	45,18	2,41	48,22	5,08	51,46	2,57	48,29	3,35	3,14	1,50	6,50	44,78
6	53,15	2,89	53,22	3,22	53,02	2,36	53,13	2,82	0,10	0,43	0,19	15,25

Tabla 9.18. Altura de agua $h = 33,8 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a16pullback338.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	17,05	1,69	16,99	1,32	17,00	3,58	17,00	2,20	0,03	1,21	0,18	55,00
2	38,70	1,42	38,23	0,91	38,00	1,50	38,31	1,28	0,36	0,32	0,94	25,00
3	39,50	2,11	39,40	1,79	39,38	1,80	39,42	1,90	0,06	0,18	0,15	9,47
4	43,21	2,93	44,65	1,82	43,92	2,39	43,93	2,38	0,72	0,56	1,64	23,53
5	45,06	1,74	45,49	2,19	45,38	2,23	45,31	2,05	0,22	0,27	0,49	13,17
6	52,40	2,68	52,86	2,76	52,98	2,24	52,75	2,56	0,30	0,28	0,57	10,94

Tabla 9.19. Altura de agua $h = 33,8 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a16pullback338.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,42	2,83	16,75	3,21	16,47	2,95	16,61	3,00	0,18	0,19	1,08	6,33
2	38,51	1,58	39,01	1,1	37,19	3,90	38,24	2,19	0,94	1,50	2,46	68,49
3	39,36	1,35	40,73	4,32	39,20	2,99	39,76	2,89	0,84	1,49	2,11	51,56
4	44,38	2,70	43,67	4,87	42,60	1,80	43,55	3,12	0,90	1,58	2,07	50,64
5	45,66	1,99	45,52	2,14	45,17	2,60	45,45	2,24	0,26	0,32	0,57	14,29
6	53,34	2,35	53,00	1,89	53,01	2,25	53,12	2,16	0,20	0,24	0,38	11,11

9.5.1.1.4. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 46,0 \text{ cm}$ Tabla 9.20. Altura de agua $h = 46,0 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a17pullback460.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,00	4,17	15,99	5,94	16,03	4,39	16,01	4,83	0,02	0,96	0,12	19,88
2	25,77	1,66	26,04	2,26	25,72	2,24	25,84	2,05	0,17	0,34	0,66	16,59
3	27,48	1,52	27,27	4,89	27,12	2,00	27,29	2,80	0,18	1,82	0,66	65,00
4	32,27	4,14	32,00	3,36	31,85	1,55	32,04	3,02	0,21	1,33	0,66	44,04
5	37,70	3,89	37,87	3,57	37,81	2,71	37,79	3,39	0,09	0,61	0,24	17,99
6	42,40	4,37	43,46	2,48	43,92	3,19	43,26	3,35	0,78	0,95	1,80	28,36

Tabla 9.21. Altura de agua $h = 46,0 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a17pullback460.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,34	5,11	16,36	4,67	16,39	4,65	16,36	4,81	0,03	0,26	0,18	5,41
2	26,43	3,64	26,26	1,67	25,94	2,19	26,21	2,50	0,25	1,02	0,95	40,80
3	27,22	5,57	27,38	1,72	27,12	3,46	27,24	3,58	0,13	1,93	0,48	53,91
4	32,00	3,78	32,03	1,53	31,78	2,95	31,94	2,75	0,14	1,14	0,44	41,45
5	38,48	5,70	38,40	2,78	38,41	3,72	38,43	4,07	0,04	1,49	0,10	36,61
6	42,50	3,83	42,30	1,05	42,11	2,24	42,30	2,37	0,19	1,39	0,45	58,65

Tabla 9.22. Altura de agua $h = 46,0 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a17pullback460.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	15,67	3,80	15,64	4,56	15,76	3,89	15,69	4,08	0,06	0,42	0,38	10,29
2	26,00	2,49	25,87	2,01	25,85	2,95	25,91	2,48	0,08	0,47	0,31	18,95
3	27,03	0,67	27,01	1,05	27,15	1,03	27,06	0,92	0,07	0,21	0,26	22,83
4	31,22	2,28	31,50	1,54	31,68	1,68	31,47	1,83	0,23	0,39	0,73	21,31
5	32,45	1,48	32,70	1,58	32,78	2,65	32,64	1,90	0,17	0,65	0,52	34,21
6	38,24	2,41	38,24	2,68	38,68	4,18	38,38	3,09	0,25	0,95	0,65	30,74

9.5.1.1.5. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 55,9 \text{ cm}$ Tabla 9.23. Altura de agua $h = 55,9 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a19pullback559.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	13,71	2,29	14,02	2,88	13,80	5,81	13,84	3,66	0,16	1,89	1,16	51,64
2	21,87	2,00	21,90	1,8	21,93	2,32	21,90	2,04	0,03	0,26	0,14	12,75
3	23,37	2,00	23,38	2,16	23,38	2,11	23,38	2,09	0,00	0,08	0,00	3,83
4	27,93	2,06	27,59	1,28	27,69	2,50	27,73	1,95	0,18	0,62	0,65	31,79
5	29,84	2,02	29,80	2,33	29,50	2,23	29,71	2,19	0,19	0,16	0,64	7,31
6	37,72	2,68	37,60	1,39	37,46	1,80	37,59	1,96	0,13	0,66	0,35	33,67

Tabla 9.24. Altura de agua $h = 55,9 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a19pullback559.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	14,01	3,93	13,98	4,17	14,03	4,45	14,01	4,18	0,02	0,26	0,14	6,22
2	21,88	4,63	22,12	2,27	22,05	1,80	22,02	2,90	0,13	1,52	0,59	52,41
3	23,70	1,65	23,95	2,33	23,45	1,24	23,70	1,74	0,25	0,55	1,05	31,61
4	28,82	1,55	28,86	3,42	28,94	1,52	28,87	2,16	0,06	1,09	0,21	50,46
5	31,70	2,57	32,00	2,95	31,67	2,32	31,79	2,61	0,18	0,32	0,57	12,26
6	37,50	1,74	37,70	4,2	37,67	1,81	37,62	2,58	0,11	1,40	0,29	54,26

Tabla 9.25. Altura de agua $h = 55,9 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a19pullback559.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	13,88	3,38	13,86	4,47	13,80	4,42	13,85	4,09	0,04	0,62	0,29	15,16
2	22,25	1,40	22,31	2,19	22,40	2,20	22,32	1,93	0,07	0,46	0,31	23,83
3	23,83	3,76	23,60	2,18	23,60	4,97	23,68	3,64	0,13	1,40	0,55	38,46
4	27,90	2,20	27,50	2,32	27,90	1,49	27,77	2,00	0,23	0,45	0,83	22,50
5	30,76	1,85	30,98	2,51	30,59	3,80	30,78	2,72	0,20	0,99	0,65	36,40
6	37,59	1,52	37,51	2,74	37,55	3,02	37,55	2,43	0,04	0,80	0,11	32,92

9.5.1.1.6. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 62,3 \text{ cm}$ Tabla 9.26. Altura de agua $h = 62,3 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a20pullback623.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	11,98	5,51	11,91	6,8	11,92	5,2	11,94	5,84	0,04	0,85	0,34	14,55
2	20,65	2,22	20,84	3,02	20,82	2,67	20,77	2,64	0,11	0,40	0,53	15,15
3	22,32	1,75	22,05	3,21	22,16	2,68	22,18	2,55	0,14	0,74	0,63	29,02
4	24,27	3,62	24,72	3,44	24,36	1,93	24,12	3,00	0,24	0,93	1,00	31,00
5	26,38	2,11	26,59	1,38	26,66	1,65	26,54	1,71	0,15	0,37	0,57	21,64
6	37,07	1,43	36,94	1,54	37,35	2,09	37,02	1,69	0,21	0,35	0,57	20,71

Tabla 9.27. Altura de agua $h = 62,3 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a20pullback623.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	12,59	5,80	12,68	3,65	12,71	3,96	12,66	4,47	0,06	1,16	0,47	25,95
2	20,73	1,69	20,75	2,14	20,88	1,72	20,79	1,85	0,08	0,25	0,38	13,51
3	22,68	1,32	22,37	1,74	22,59	2,35	22,48	1,80	0,16	0,52	0,71	28,89
4	24,47	2,05	24,42	2,21	24,53	2,01	24,47	2,09	0,05	0,11	0,20	5,26
5	27,90	1,50	27,70	1,6	27,97	1,62	27,52	1,57	0,14	0,06	0,51	3,82
6	36,93	1,12	36,73	1,79	36,94	1,37	36,87	1,43	0,12	0,34	0,33	23,78

Tabla 9.28. Altura de agua $h = 62,3 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a20pullback623.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	12,61	4,58	12,56	4,12	12,51	4,56	12,56	4,42	0,05	0,26	0,40	5,88
2	20,92	2,68	20,93	1,77	20,99	1,86	20,95	2,10	0,04	0,50	0,19	23,81
3	23,26	1,33	23,48	2,57	23,05	2,28	23,26	2,06	0,21	0,65	0,90	31,55
4	24,18	4,70	24,25	2,32	24,32	3,33	24,25	3,45	0,07	1,19	0,29	34,49
5	27,44	3,90	27,00	1,92	27,00	3,48	27,15	3,10	0,25	1,04	0,92	33,55
6	36,83	1,62	36,73	1,92	36,80	1,47	36,79	1,67	0,05	0,23	0,14	13,77

9.5.1.1.7. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 73,1 \text{ cm}$ Tabla 9.29. Altura de agua $h = 73,1 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a11pullback731.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	10,44	1,31	10,47	2,28	10,51	3,63	10,47	2,41	0,04	1,17	0,38	48,55
2	20,40	4,69	19,93	2,58	20,08	2,29	20,14	3,19	0,24	1,31	1,19	41,07
3	22,91	2,85	22,58	2,69	22,98	1,23	22,82	2,26	0,21	0,89	0,92	39,38
4	25,50	3,13	25,23	2,07	25,20	2,72	25,31	2,64	0,16	0,53	0,63	20,08
5	27,56	3,00	27,75	1,85	27,87	2,32	27,73	2,39	0,15	0,58	0,54	24,27
6	37,46	4,35	37,41	1,15	37,49	1,43	37,45	2,31	0,04	1,77	0,11	76,62

Tabla 9.30. Altura de agua $h = 73,1 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a11pullback731.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	11,35	1,34	11,21	1,29	11,34	3,11	11,30	1,91	0,08	1,04	0,71	54,45
2	20,32	1,12	20,19	2,09	20,29	2,24	20,27	1,82	0,07	0,61	0,35	33,52
3	23,81	1,50	24,13	3,03	23,68	2,03	23,87	2,19	0,23	0,78	0,96	35,62
4	25,22	2,67	25,27	2,54	25,12	2,94	25,20	2,72	0,08	0,20	0,32	7,35
5	27,48	2,34	27,51	2,87	27,88	4,12	27,62	3,11	0,22	0,91	0,80	29,26
6	37,34	1,48	37,33	1,51	37,61	1,55	37,43	1,51	0,16	0,04	0,43	2,65

Tabla 9.31. Altura de agua $h = 73,1 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a11pullback731.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	10,31	2,99	10,40	2,54	10,41	3,02	10,37	2,85	0,06	0,27	0,58	9,47
2	20,57	3,62	20,90	5,64	20,62	4,85	20,70	4,70	0,18	1,02	0,87	21,70
3	23,62	2,52	23,42	3,06	23,36	3,01	23,47	2,86	0,14	0,30	0,60	10,49
4	27,67	4,45	27,38	3,55	27,37	4,62	27,47	4,21	0,17	0,58	0,62	13,78
5	29,51	1,89	29,82	2,02	29,67	1,72	29,67	1,88	0,15	0,15	0,51	7,98
6	37,55	1,63	37,31	1,35	37,19	1,39	37,35	1,46	0,18	0,15	0,48	10,27

9.5.1.1.8. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 73,5 \text{ cm}$ Tabla 9.32. Altura de agua $h = 73,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro a08pullback735.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	10,37	2,98	10,16	2,91	10,29	2,16	10,27	2,68	0,11	0,45	1,07	16,79
2	20,23	3,07	20,32	2,35	20,53	2,65	20,36	2,69	0,16	0,36	0,79	13,38
3	23,13	1,37	23,34	1,61	23,08	2,71	23,18	1,90	0,14	0,71	0,60	37,37
4	25,49	3,03	25,35	3,62	25,16	2,45	25,33	3,03	0,16	0,59	0,63	19,47
5	28,27	1,57	28,08	3,35	27,58	3,28	27,98	2,73	0,36	1,01	1,29	37,00
6	37,64	1,76	37,91	1,59	37,84	2,00	37,80	1,78	0,14	0,21	0,37	11,80

Tabla 9.33. Altura de agua $h = 73,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro a08pullback735.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	11,20	1,96	11,14	1,87	11,13	2,42	11,16	2,08	0,04	0,30	0,36	14,42
2	20,27	1,74	20,27	1,77	20,22	1,92	20,25	1,81	0,03	0,10	0,15	5,52
3	23,70	1,50	24,17	1,85	23,74	0,67	23,87	1,34	0,26	0,61	1,09	45,52
4	25,30	2,16	25,17	4,36	24,56	4,61	25,01	3,71	0,40	1,35	1,60	36,39
5	27,64	1,56	27,85	3,39	27,98	4,64	27,82	3,20	0,17	1,55	0,61	48,44
6	37,60	1,01	37,42	2,19	37,79	1,28	37,61	1,49	0,19	0,62	0,51	41,61

Tabla 9.34. Altura de agua $h = 73,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro a08pullback735.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	10,20	2,35	10,37	2,06	10,34	3,12	10,30	2,51	0,09	0,55	0,87	21,91
2	20,11	5,23	20,55	3,99	20,33	4,26	20,33	4,49	0,22	0,65	1,08	14,48
3	23,43	3,72	23,13	4,28	23,32	2,96	23,29	3,65	0,15	0,66	0,64	18,08
4	25,68	0,23	25,64	6,04	26,07	4,23	25,80	3,50	0,24	2,97	0,93	84,86
5	29,82	1,36	29,33	1,53	29,59	1,93	29,58	1,61	0,25	0,29	0,85	18,01
6	37,73	1,70	37,85	1,7	36,98	1,12	37,85	1,51	0,13	0,33	0,34	21,85

9.5.1.2. Configuración B de sensores

9.5.1.2.1. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 0 \text{ cm}$ Tabla 9.35. Altura de agua $h = 0 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b01pullback000.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,61	2,91	18,13	1,02	17,94	1,21	18,23	1,71	0,34	1,04	1,87	60,82
2	22,11	3,20	20,32	0,05	21,35	0,75	21,26	1,33	0,90	1,65	4,23	124,06
3	79,15	2,16	79,28	2,08	79,27	2,18	79,24	2,14	0,07	0,05	0,09	2,34
4	82,64	2,28	82,74	2,12	82,77	1,75	82,71	2,05	0,07	0,27	0,08	13,17
5	84,78	2,10	84,58	2,6	84,50	2,90	84,62	2,53	0,14	0,40	0,17	15,81
6	86,35	2,86	85,69	2,94	85,77	2,92	85,93	2,91	0,36	0,04	0,42	1,37

Tabla 9.36. Altura de agua $h = 0 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b01pullback000.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,03	3,66	17,96	3,97	17,91	3,72	17,97	3,78	0,06	0,16	0,33	4,23
2	18,89	1,94	18,82	2,14	18,78	2,30	18,83	2,13	0,06	0,18	0,32	8,45
3	79,74	2,55	79,53	2,53	79,56	2,47	79,61	2,52	0,11	0,04	0,14	1,59
4	82,80	1,98	84,78	2,69	84,08	2,78	83,89	2,48	1,00	0,44	1,19	17,74
5	84,96	2,03	85,27	2,04	85,03	1,99	85,09	2,02	0,16	0,03	0,19	1,49

Tabla 9.37. Altura de agua $h = 0 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b01pullback000.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	17,92	2,97	17,98	2,84	17,93	3,1	17,95	2,97	0,03	0,13	0,17	4,38
2	20,44	2,96	19,13	2,88	21,02	0,89	20,20	2,24	0,97	1,17	4,80	52,23
3	79,52	2,48	79,52	2,48	79,43	2,41	79,49	2,46	0,06	0,04	0,08	1,63
4	83,11	2,33	83,16	2,46	83,21	2,00	83,16	2,26	0,05	0,24	0,06	10,62
5	85,21	1,92	85,15	1,94	85,02	2,03	85,13	1,96	0,10	0,06	0,12	3,06
6	17,92	2,97	17,98	2,84	17,93	3,1	17,95	2,97	1,35	0,27	7,52	9,09

9.5.1.2.2. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 10,5 \text{ cm}$ Tabla 9.38. Altura de agua $h = 10,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b02pullback105.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,29	1,35	18,22	1,83	18,30	1,59	18,27	1,59	0,04	0,24	0,22	15,09
2	20,18	1,80	20,00	2,15	20,06	0,49	20,08	1,48	0,09	0,88	0,45	59,46
3	79,25	2,10	79,15	2,07	78,97	2,15	79,13	2,11	0,14	0,04	0,18	1,90
4	81,97	1,81	81,93	1,57	82,04	1,74	81,98	1,71	0,06	0,12	0,07	7,02
5	84,32	4,21	84,24	3,92	83,78	3,93	84,12	4,02	0,29	0,16	0,34	3,98
6	85,12	2,30	85,11	2,15	85,12	2,11	85,12	2,19	0,01	0,10	0,01	4,57

Tabla 9.39. Altura de agua $h = 10,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b02pullback105.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,32	4,65	18,27	4,68	18,17	4,33	18,25	4,55	0,07	0,19	0,38	4,18
2	19,13	1,08	19,16	1,4	19,04	1,29	19,11	1,26	0,06	0,16	0,31	12,70
3	79,41	2,72	79,53	2,69	79,47	2,72	79,47	2,71	0,06	0,02	0,08	0,74
4	82,37	0,43	81,61	0,66	83,07	0,62	82,35	0,57	0,73	0,12	0,89	21,05
5	84,70	2,13	84,70	2,1	84,70	2,10	84,70	2,11	0,00	0,02	0,00	0,95
6	100,01	1,91	99,91	2	99,84	2,15	99,92	2,02	0,09	0,12	0,09	5,94

Tabla 9.40. Altura de agua $h = 10,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b02pullback105.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,84	1,68	18,17	3,03	18,25	2,81	18,42	2,51	0,36	0,72	1,95	28,69
2	78,37	3,00	79,47	2,51	79,39	2,50	79,07	2,67	0,61	0,29	0,77	10,86
3	82	2,94	82,01	2,72	82,32	2,22	81,38	2,63	0,18	0,37	0,22	14,07
4	84,24	2,01	84,92	2,01	84,84	1,95	84,66	1,99	0,37	0,03	0,44	1,51
5	93,00	2,37	93,77	2,72	92,35	2,68	90,75	2,59	0,71	0,19	0,78	7,34
6	96,25	2,64	100,08	1,97	100,06	1,86	98,79	2,16	2,21	0,42	2,24	19,44

9.5.1.2.3. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 20,2 \text{ cm}$ Tabla 9.41. Altura de agua $h = 20,2 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b03pullback202.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,08	2,12	18,26	2,04	18,10	1,4	18,15	1,85	0,10	0,39	0,55	21,08
2	70,80	1,66	70,89	2,26	70,85	2,35	70,85	2,09	0,05	0,38	0,07	18,18
3	70,90	2,19	73,32	2,67	73,14	2,34	72,45	2,40	1,35	0,25	1,86	10,42
4	73,32	2,52	75,51	2,69	75,29	2,58	74,71	2,60	1,21	0,09	1,62	3,46
5	75,22	2,60	77,79	1,65	77,06	2,01	76,69	2,09	1,32	0,48	1,72	22,97
6	84,00	1,90	84,15	2,15	84,20	2,33	84,12	2,13	0,10	0,22	0,12	10,33

Tabla 9.42. Altura de agua $h = 20,2 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b03pullback202.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,93	2,42	18,75	2,88	18,57	3,84	18,75	3,05	0,18	0,72	0,96	23,61
2	71,58	2,34	71,78	2,55	71,40	2,22	71,59	2,37	0,19	0,17	0,27	7,17
3	73,39	2,15	73,44	2,16	73,05	2,73	73,30	2,35	0,21	0,33	0,29	14,04
4	75,38	2,18	75,47	1,88	75,17	2,24	75,34	2,10	0,16	0,19	0,21	9,05
5	80,39	2,32	80,23	3,22	80,25	2,69	80,29	2,74	0,09	0,45	0,11	16,42
6	83,87	3,52	84,21	2,41	84,51	2,23	84,20	2,72	0,32	0,70	0,38	25,74

Tabla 9.43. Altura de agua $h = 20,2 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b03pullback202.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	18,86	3,28	18,99	2,75	18,91	2,89	18,92	2,97	0,07	0,27	0,37	9,09
2	71,08	2,03	71,32	2,03	71,13	2,19	71,18	2,08	0,13	0,09	0,18	4,33
3	73,19	2,33	73,46	2,41	73,23	2,27	73,29	2,34	0,15	0,07	0,20	2,99
4	74,93	2,42	75,22	2,45	75,10	2,33	75,08	2,40	0,14	0,06	0,19	2,50
5	79,94	2,63	80,46	3,12	80,37	2,96	80,26	2,90	0,28	0,25	0,35	8,62
6	84,22	2,90	84,45	2,56	84,04	2,56	84,24	2,67	0,21	0,20	0,25	7,49

9.5.1.2.4. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 31,5 \text{ cm}$ Tabla 9.44. Altura de agua $h = 31,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b04pullback315.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,42	3,89	16,77	3,24	16,60	3,92	16,60	3,68	0,17	0,38	1,02	10,33
2	41,27	2,17	41,36	2,17	41,34	2,20	41,33	2,18	0,05	0,02	0,12	0,92
3	42,54	1,69	42,67	1,89	42,68	1,98	42,63	1,85	0,08	0,15	0,19	8,11
4	43,82	1,56	44,06	1,75	43,77	2,16	43,88	1,82	0,16	0,31	0,36	17,03
5	47,27	1,88	47,31	1,85	47,26	1,84	47,28	1,86	0,02	0,02	0,04	1,08
6	50,14	1,66	50,14	1,84	50,20	1,88	50,16	1,79	0,04	0,12	0,08	6,70

Tabla 9.45. Altura de agua $h = 31,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b04pullback315.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,65	2,69	16,58	2,61	16,57	2,68	16,60	2,66	0,04	0,04	0,24	1,50
2	41,78	2,48	41,79	1,83	41,77	2,25	41,78	2,19	0,01	0,33	0,02	15,07
3	42,60	1,89	42,67	1,83	42,46	1,57	42,58	1,76	0,11	0,17	0,26	9,66
4	43,82	1,49	43,80	1,75	43,85	1,54	43,83	1,59	0,03	0,14	0,07	8,81
5	47,26	1,56	47,26	1,77	47,26	1,65	47,26	1,66	0,00	0,11	0,00	6,63
6	50,62	1,68	50,73	1,66	50,81	1,71	50,72	1,68	0,10	0,03	0,20	1,79

Tabla 9.46. Altura de agua $h = 31,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b04pullback315.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,38	2,70	16,36	3,08	16,24	2,46	16,33	2,75	0,08	0,31	0,49	11,27
2	40,90	3,70	41,20	2,86	41,00	1,70	41,04	2,75	0,15	1,00	0,37	36,36
3	42,66	1,30	42,38	1,28	42,76	1,07	42,60	1,22	0,20	0,13	0,47	10,66
4	43,63	0,96	43,98	1,35	43,99	0,60	43,86	0,97	0,20	0,38	0,46	39,18
5	47,46	1,76	47,12	1,56	47,04	1,08	47,21	1,47	0,22	0,35	0,47	23,81
6	50,87	2,08	50,38	2,02	50,91	1,66	50,72	1,92	0,30	0,23	0,59	11,98

9.5.1.2.5. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 40,5 \text{ cm}$ Tabla 9.47. Altura de agua $h = 40,5 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b05pullback405.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	15,38	4,74	15,43	4,06	15,41	5,14	15,41	4,65	0,02	0,55	0,13	11,83
2	29,84	1,99	29,83	1,81	29,83	1,68	29,84	1,83	0,01	0,16	0,03	8,74
3	30,65	1,70	30,84	1,41	30,92	1,46	30,80	1,52	0,14	0,16	0,45	10,53
4	31,93	2,51	31,59	1,74	31,68	1,37	31,73	1,87	0,18	0,58	0,57	31,02
5	34,70	2,38	34,36	1,75	34,37	1,54	34,48	1,89	0,19	0,44	0,55	23,28
6	36,54	1,69	36,30	1,76	36,40	1,67	36,41	1,71	0,12	0,05	0,33	2,92

Tabla 9.48. Altura de agua $h = 40,5 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b05pullback405.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,44	4,31	16,48	4,68	16,47	4,8	16,46	4,60	0,02	0,26	0,12	5,65
2	29,83	2,25	29,93	1,84	29,87	1,63	29,87	1,91	0,05	0,32	0,17	16,75
3	30,44	1,53	30,43	1,65	30,51	1,52	30,46	1,57	0,04	0,07	0,13	4,46
4	31,68	1,72	31,65	1,62	31,65	1,55	31,66	1,63	0,02	0,09	0,06	5,52
5	34,60	1,44	34,53	1,67	34,57	1,68	34,57	1,60	0,03	0,14	0,09	8,75
6	35,92	1,39	35,63	1,53	35,74	1,41	35,76	1,44	0,15	0,08	0,42	5,56

Tabla 9.49. Altura de agua $h = 40,5 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b05pullback405.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	16,24	3,71	16,08	3,56	16,07	4,3	16,13	3,86	0,10	0,39	0,62	10,10
2	28,96	3,23	30,20	2,58	29,87	1,59	29,68	2,47	0,65	0,83	2,19	33,60
3	30,92	2,49	30,90	1,99	30,89	1,59	30,90	2,02	0,01	0,45	0,03	22,28
4	31,25	3,06	31,92	1,19	31,71	1,71	31,63	1,99	0,34	0,97	1,07	48,74
5	34,59	1,46	34,66	1,52	34,62	1,58	34,62	1,52	0,03	0,06	0,09	3,95
6	36,26	1,25	36,43	1,57	36,44	1,59	36,37	1,47	0,10	0,19	0,27	12,93

9.5.1.2.6. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 50,3 \text{ cm}$ Tabla 9.50. Altura de agua $h = 50,3 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b06pullback503.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	14,31	3,89	14,05	3,64	14,00	4,1	14,12	3,88	0,17	0,23	1,20	5,93
2	23,96	1,62	23,93	1,59	23,96	1,56	23,95	1,59	0,01	0,03	0,04	1,89
3	25,03	2,37	25,17	1,56	25,07	1,81	25,09	1,91	0,07	0,41	0,28	21,47
4	27,90	1,39	27,75	2,05	27,54	1,60	27,73	1,68	0,18	0,34	0,65	20,24
5	29,97	1,38	29,96	1,37	29,82	1,26	29,92	1,34	0,08	0,07	0,27	5,22
6	35,00	2,12	35,02	3,13	35,20	2,40	35,07	2,55	0,11	0,52	0,31	20,39

Tabla 9.51. Altura de agua $h = 50,3 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b06pullback503.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	14,83	4,58	14,89	5,04	14,86	4,71	14,86	4,78	0,03	0,24	0,20	5,02
2	24,01	1,63	24,03	1,52	24,02	1,50	24,02	1,55	0,01	0,07	0,04	4,52
3	25,60	1,79	25,58	1,72	25,59	1,62	25,59	1,71	0,01	0,09	0,04	5,26
4	27,45	1,93	27,49	1,77	27,46	1,69	27,47	1,80	0,02	0,12	0,07	6,67
5	29,96	2,64	29,80	2,01	29,79	1,74	29,85	2,13	0,10	0,46	0,34	21,60
6	38,50	2,53	38,61	1,54	38,46	2,33	38,52	2,13	0,08	0,52	0,21	24,41

Tabla 9.52. Altura de agua $h = 50,3 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b06pullback503.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	14,60	3,95	14,51	4,22	14,63	4,18	14,58	4,12	0,06	0,15	0,41	3,64
2	24,32	1,68	24,32	1,69	24,40	1,77	24,35	1,71	0,05	0,05	0,21	2,92
3	25,05	1,39	25,03	1,65	25,07	1,43	25,05	1,49	0,02	0,14	0,08	9,40
4	27,51	1,67	27,52	1,67	27,50	1,60	27,51	1,65	0,01	0,04	0,04	2,42
5	30,03	1,40	29,92	1,45	29,93	1,38	29,96	1,41	0,06	0,04	0,20	2,84
6	37,77	2,15	37,95	1,93	37,70	2,42	37,81	2,17	0,13	0,25	0,34	11,52

9.5.1.2.7. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 60,1 \text{ cm}$ Tabla 9.53. Altura de agua $h = 60,1 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b07pullback601.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	12,49	3,32	12,39	4,87	12,49	5,49	12,45	4,56	0,06	1,12	0,48	24,56
2	21,25	1,75	21,17	1,62	21,20	1,58	21,21	1,65	0,04	0,09	0,19	5,45
3	22,49	2,10	22,48	1,92	22,54	2,00	22,50	2,01	0,03	0,09	0,13	4,48
4	24,02	1,64	24,32	1,26	24,16	1,35	24,17	1,42	0,15	0,20	0,62	14,08
5	27,21	1,56	27,23	1,61	27,26	1,41	27,23	1,53	0,03	0,10	0,11	6,54
6	30,78	2,46	30,73	2,46	31,00	2,44	30,84	2,45	0,14	0,01	0,45	0,41

Tabla 9.54. Altura de agua $h = 60,1 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b07pullback601.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	13,24	6,92	12,99	4,86	13,00	6,23	13,08	6,00	0,14	1,05	1,07	17,50
2	21,25	1,34	21,28	1,58	21,25	1,67	21,26	1,53	0,02	0,17	0,09	11,11
3	22,74	1,56	22,85	1,71	22,44	1,73	22,68	1,67	0,22	0,09	0,97	5,39
4	24,00	1,23	24,08	2,07	23,92	1,66	24,00	1,65	0,08	0,42	0,33	25,45
5	27,06	1,69	27,17	1,52	27,21	1,63	27,15	1,61	0,08	0,09	0,29	5,59
6	31,00	2,09	31,20	2,47	31,00	3,06	31,07	2,54	0,11	0,49	0,35	19,29

Tabla 9.55. Altura de agua $h = 60,1 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b07pullback601.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	12,79	3,73	12,79	4,88	12,80	3,78	12,80	4,13	0,01	0,65	0,08	15,74
2	21,31	1,72	21,35	1,42	21,34	1,68	21,33	1,61	0,02	0,16	0,09	9,94
3	22,47	1,87	22,68	3,23	22,43	1,71	22,53	2,27	0,13	0,84	0,58	37,00
4	24,02	1,68	24,16	1,71	24,02	1,70	24,07	1,70	0,08	0,02	0,33	1,18
5	27,16	2,09	27,18	2,91	27,11	1,55	27,15	2,18	0,03	0,68	0,11	31,19
6	30,96	1,84	31,19	1,84	31,09	1,88	31,08	1,85	0,12	0,02	0,39	1,08

9.5.1.2.8. Resultados ITD aplicado a ensayo de impacto, altura de agua $h = 68,3 \text{ cm}$ Tabla 9.56. Altura de agua $h = 68,3 \text{ cm}$, impactos en zona 1, registro b08pullback683.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	20,58	1,59	20,55	1,65	20,54	1,66	20,56	1,63	0,02	0,04	0,10	2,45
2	21,91	1,53	21,91	1,67	21,72	2,19	21,85	1,80	0,11	0,35	0,50	19,44
3	23,20	1,62	23,66	1,65	23,40	3,02	23,42	2,10	0,23	0,80	0,98	38,10
4	26,07	1,48	26,12	2,12	26,00	2,17	26,06	1,92	0,06	0,38	0,23	19,79
5	30,00	1,79	30,27	2,01	30,00	2,39	30,09	2,06	0,16	0,30	0,53	14,56
6	37,28	1,71	37,26	1,5	37,06	1,88	37,20	1,70	0,12	0,19	0,32	11,18

Tabla 9.57. Altura de agua $h = 68,3 \text{ cm}$, impactos en zona 2, registro b08pullback683.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	20,48	1,53	20,43	1,8	20,47	1,67	20,46	1,67	0,03	0,14	0,15	8,38
2	21,95	1,94	22,01	1,5	22,06	1,20	22,01	1,55	0,05	0,37	0,23	23,87
3	23,68	1,44	23,40	4,37	23,50	1,99	23,53	2,60	0,14	1,56	0,59	60,00
4	26,13	1,71	26,37	2,56	26,38	2,89	26,29	2,39	0,14	0,61	0,53	25,52
5	29,88	2,32	29,96	1,98	30,35	3,03	30,06	2,44	0,25	0,54	0,83	22,13
6	37,27	1,47	37,08	2,79	37,00	2,45	37,12	2,24	0,14	0,69	0,38	30,80

Tabla 9.58. Altura de agua $h = 68,3 \text{ cm}$, impactos en zona 3, registro b08pullback683.

Modos	Impacto 1		Impacto 2		Impacto 3		Promedio		σ		C_v (%)	
	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f (Hz)	β (%)	f	β
1	20,57	1,78	20,55	1,45	20,48	1,75	20,53	1,66	0,05	0,18	0,24	10,84
2	23,22	1,46	23,05	1,16	23,12	1,34	23,13	1,32	0,08	0,15	0,35	11,36
3	23,60	2,18	23,80	2,28	23,71	1,80	23,71	2,09	0,10	0,25	0,42	11,96
4	29,18	2,10	29,38	1,32	29,50	1,22	29,35	1,55	0,16	0,48	0,55	30,97
5	30,26	1,60	30,42	1,51	30,39	1,49	30,35	1,53	0,08	0,06	0,26	3,92
6	37,25	1,27	37,41	1,44	37,68	2,11	37,45	1,61	0,22	0,44	0,59	27,33

9.5.2. Método de Identificación Deterministic-Stochastic Subspace Identification (DSI)

9.5.2.1. Identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo

Se aplica el análisis por pequeñas ventanas de tiempo a los siguientes registros de respuesta del estanque de almacenamiento cuando es vaciado en el tiempo a distintas alturas de columna de agua en su interior con y sin excitación en la base. Los resultados que se muestran a continuación corresponden a la respuesta de aceleraciones de aquellos registros procesados con el método. Y consisten en:

- Una tabla que detalla los inputs para generar los diagramas de estabilidad.
- Tres diagramas de estabilidad, los cuales se construyen al tomar una pequeña ventana de tiempo al principio, a la mitad y al final del registro, respectivamente.
- Una tabla donde se detallan las frecuencias iniciales de cada modo encontrado gracias al primer diagrama de estabilidad, cuyos valores son esenciales para generar las formas modales de la estructura y los gráficos comparativos de frecuencias, amortiguamientos y MAC.
- Formas modales que corresponden a las que se les realiza el seguimiento a lo largo del tiempo.
- Tres gráficos que señalan en conjunto el comportamiento dinámico de la estructura.

9.5.2.1.1. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo

Tabla 9.59. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	-
Acelerómetros outputs	A1-A10 y A13
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	324
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	136
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	290
#Ventana 3	271
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	560

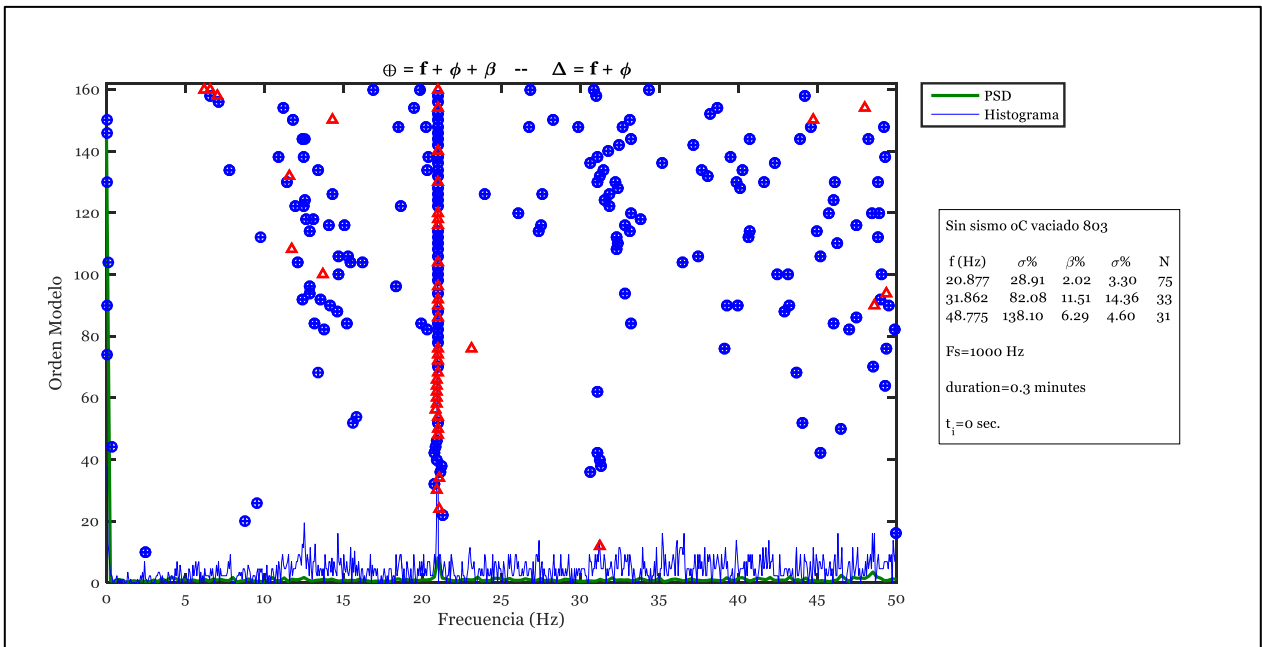


Figura 9.16. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

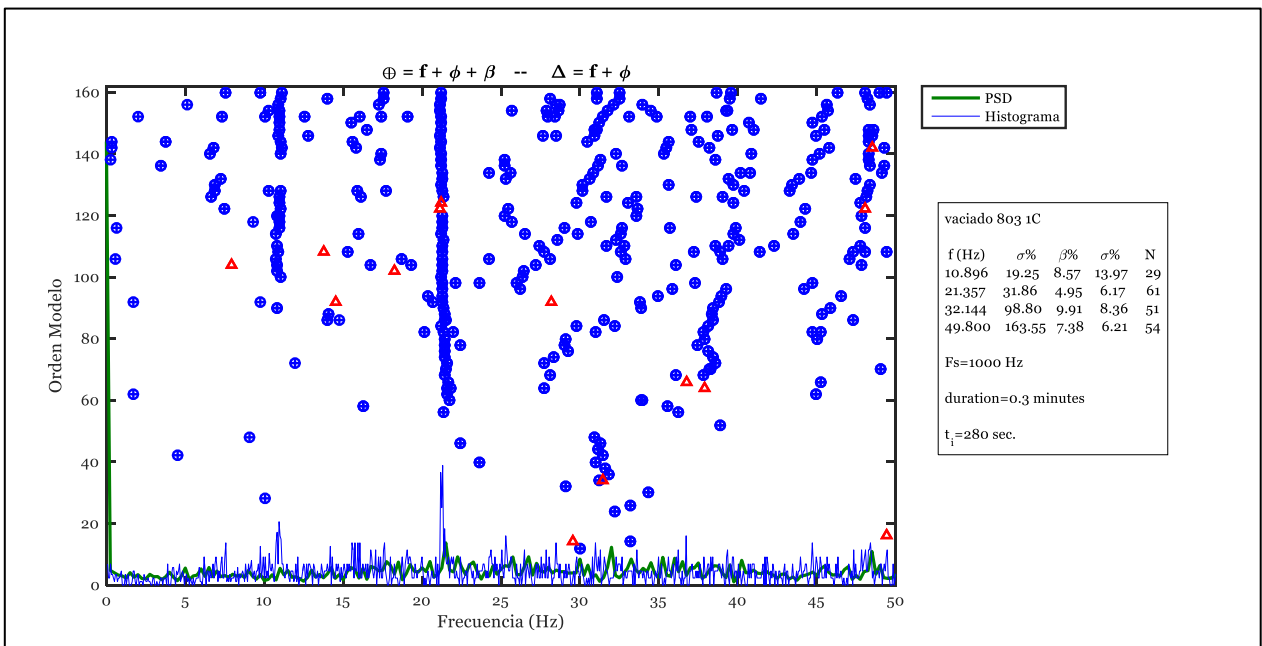


Figura 9.17. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

Con respecto a la ventana 3, no arroja ningún resultado, dada la baja energía que presenta el sistema.

Tabla 9.60. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

Parámetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Frecuencia inicial (Hz)	N.I.	N.I.	20,97	N.I.
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	N.I.	N.I.	1	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	N.I.	N.I.	90	N.I.

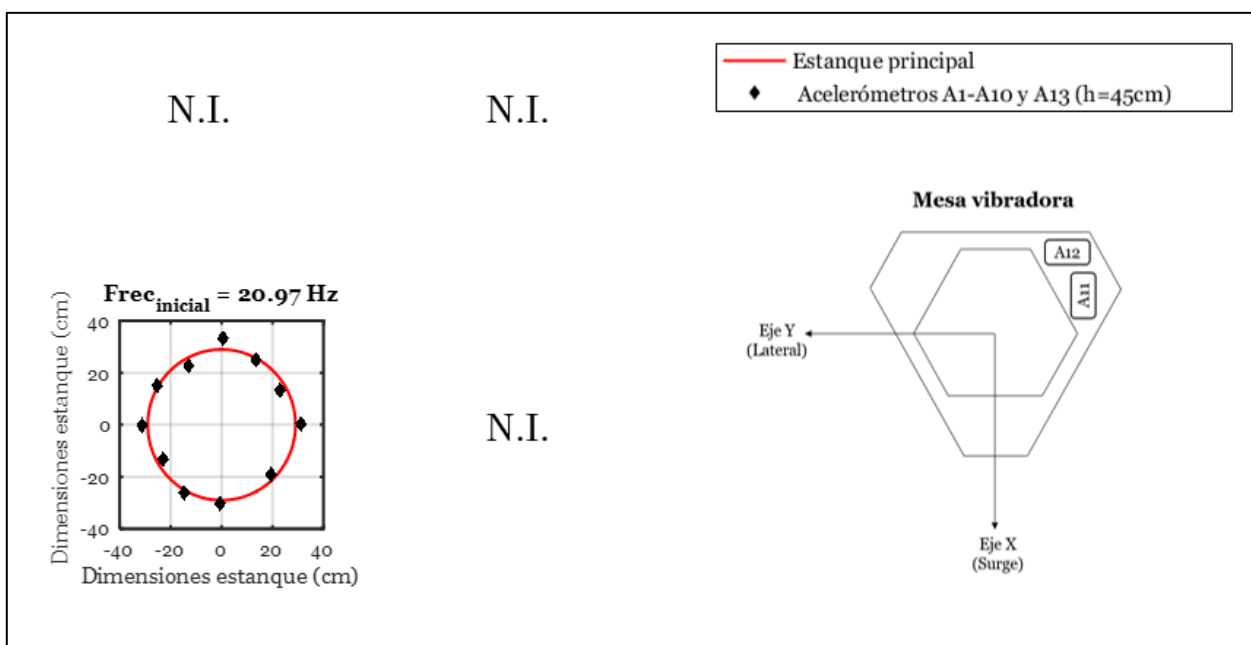


Figura 9.18. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

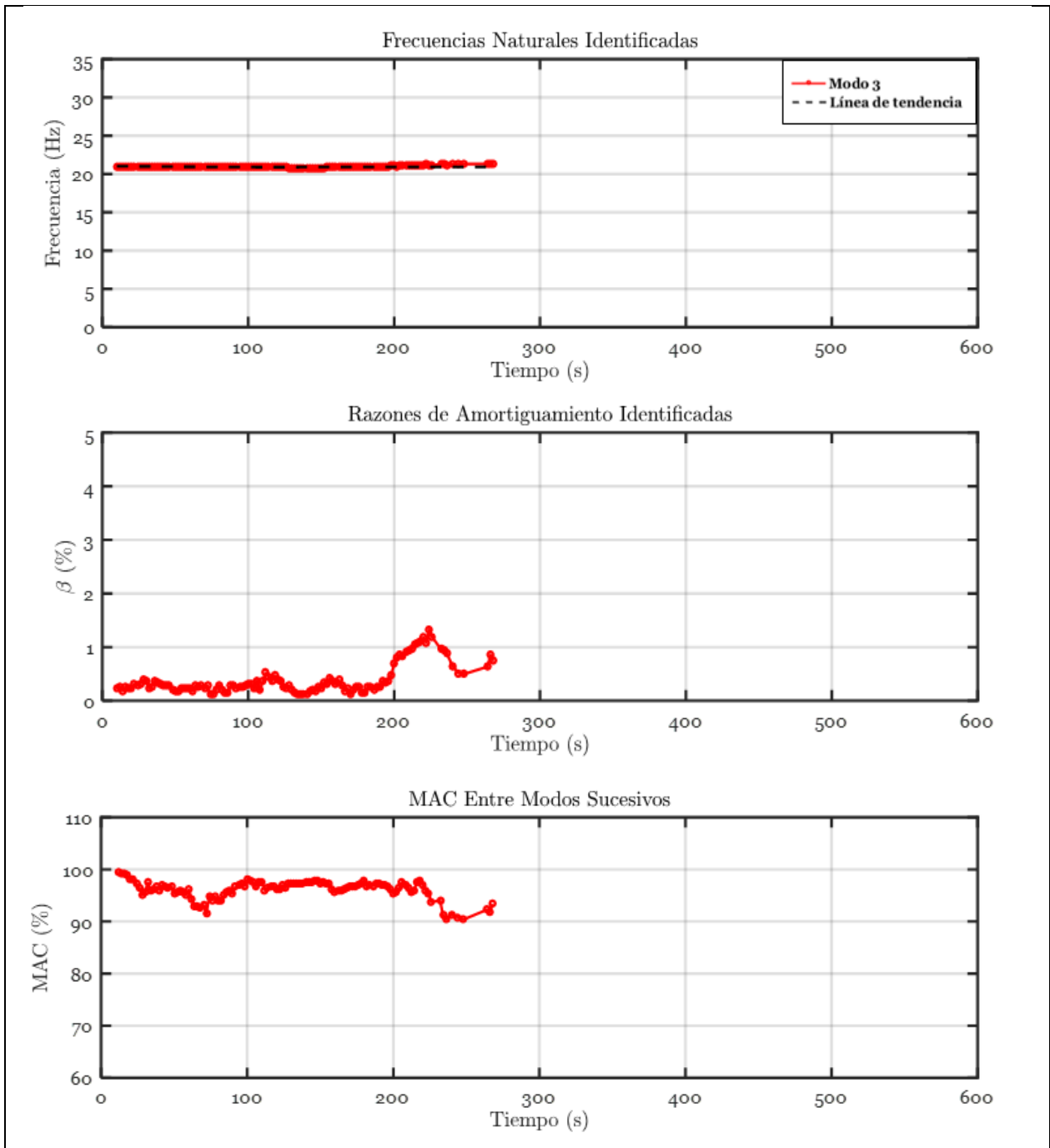


Figura 9.19. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

9.5.2.1.2. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691

Tabla 9.61. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
GDL o n'	120
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	95%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	435
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	211
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	250
#Ventana 3	411
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	450

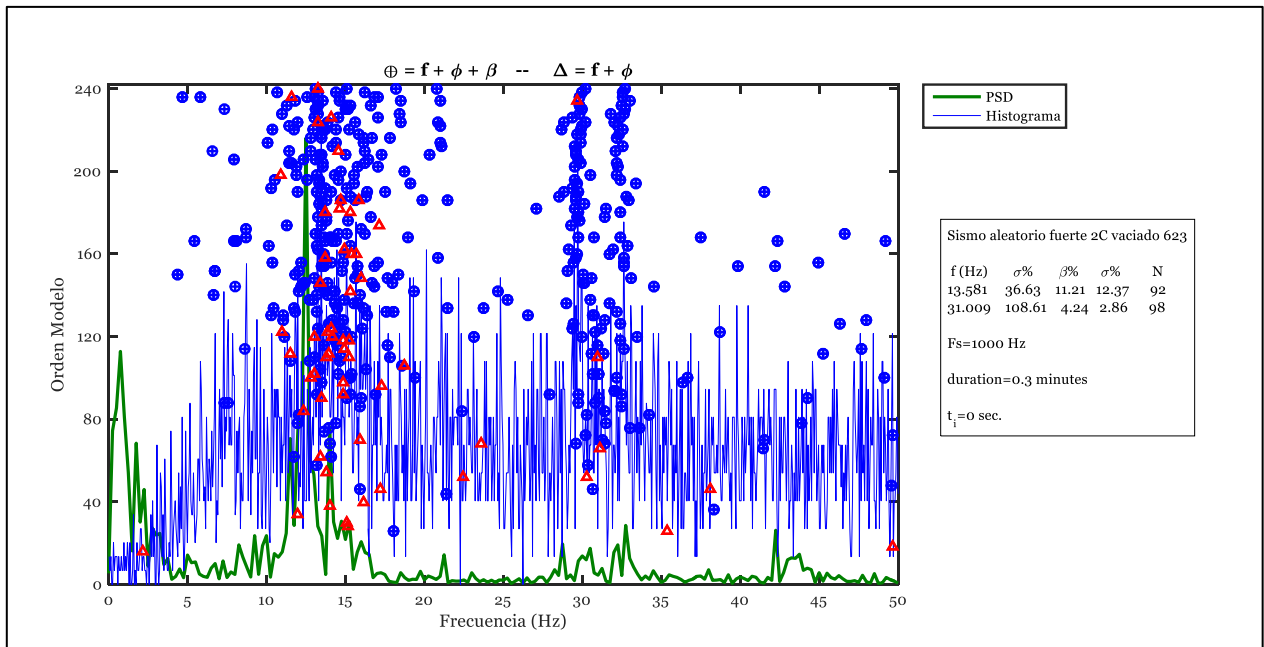


Figura 9.20. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

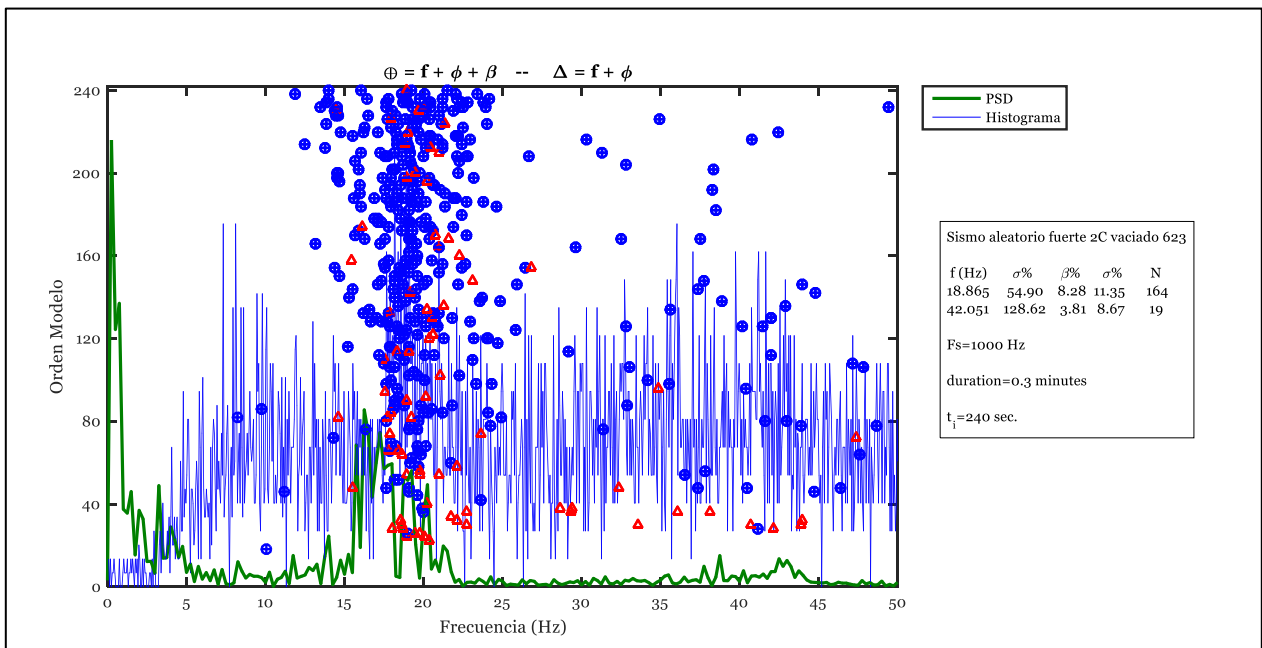


Figura 9.21. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

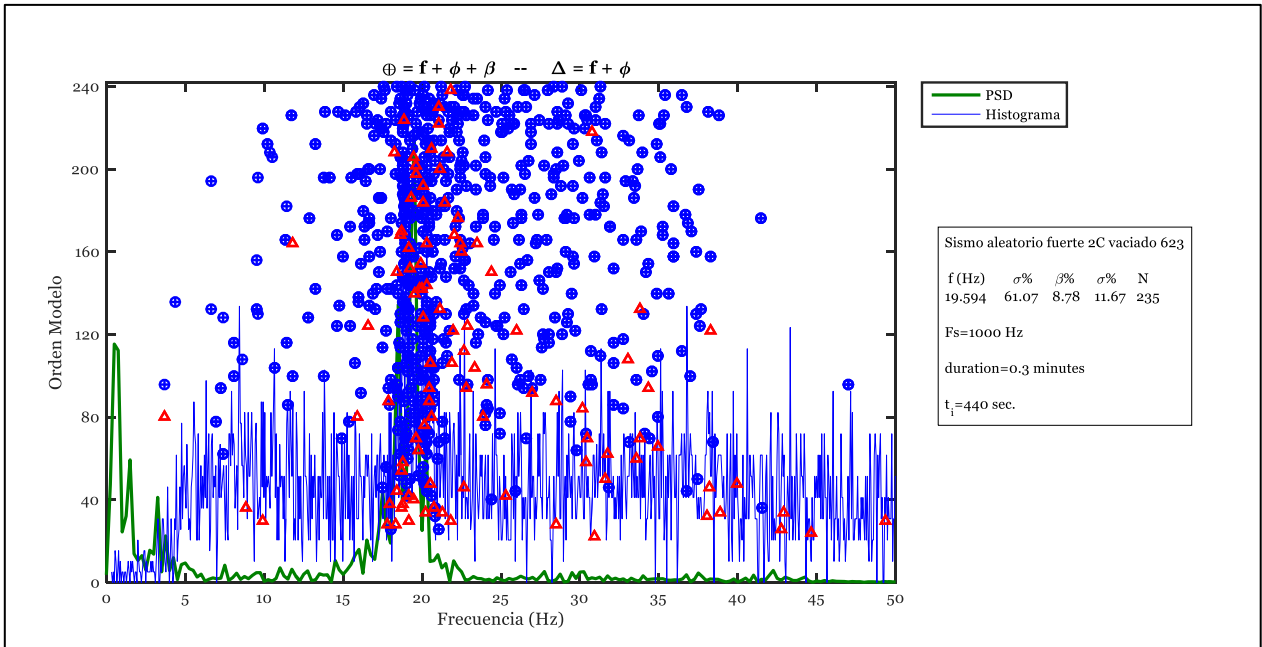


Figura 9.22. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

Tabla 9.62. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

Parámetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Frecuencia inicial (Hz)	13,77	15,49	N.I.	29,57
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	10	8	N.I.	10
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	95	95	N.I.	90

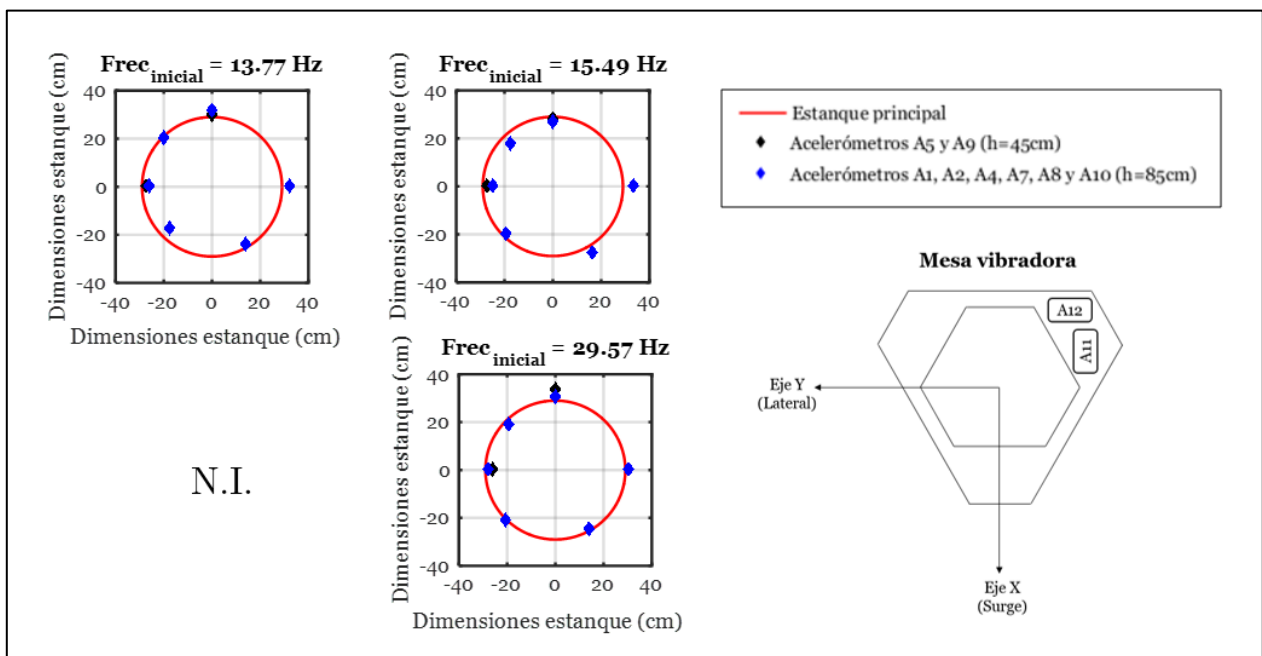


Figura 9.23. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

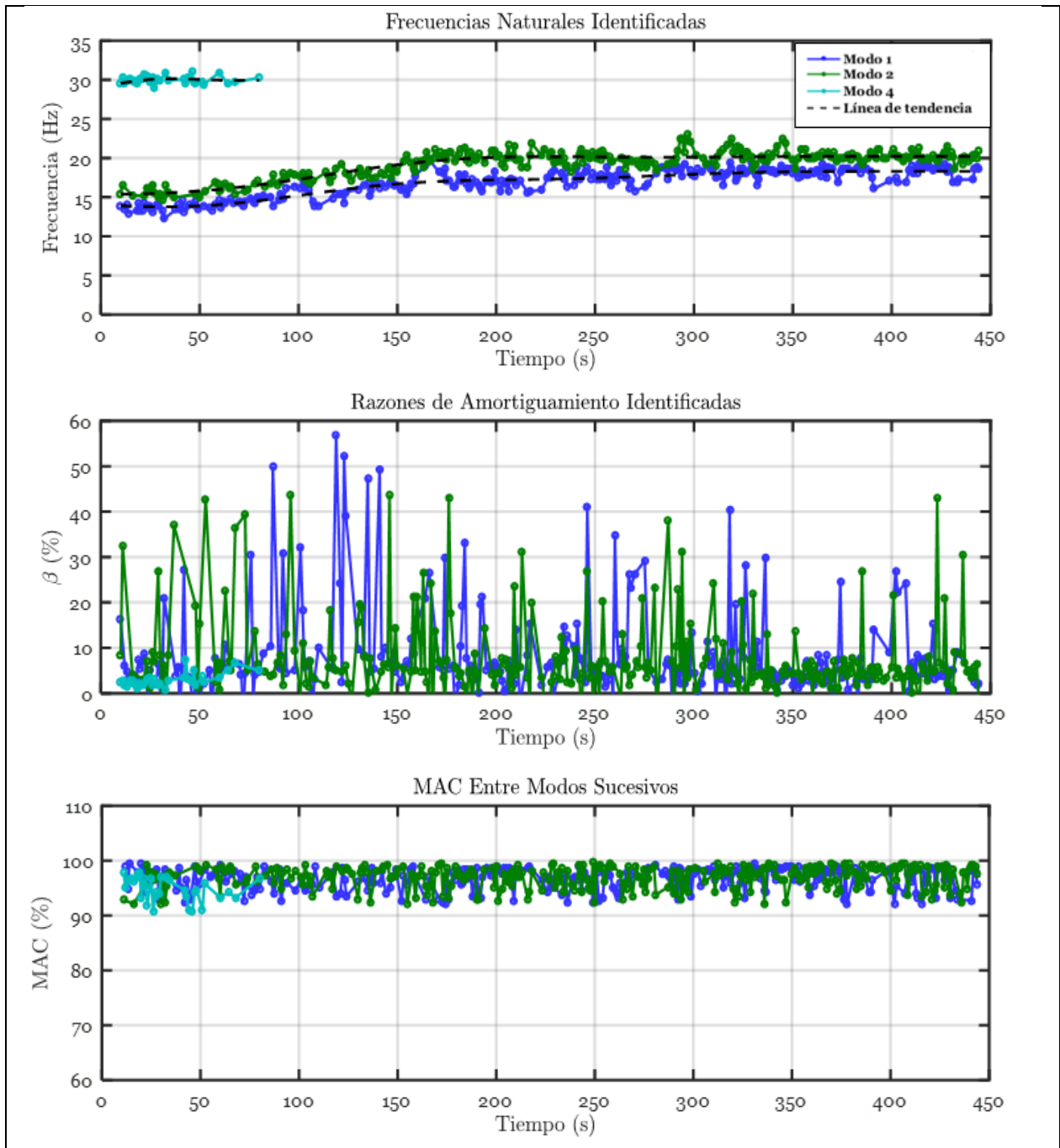


Figura 9.24. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

9.5.2.1.3. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693

Tabla 9.63. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1-A10 y A13
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	278
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	101
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	290
#Ventana 3	236
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	560

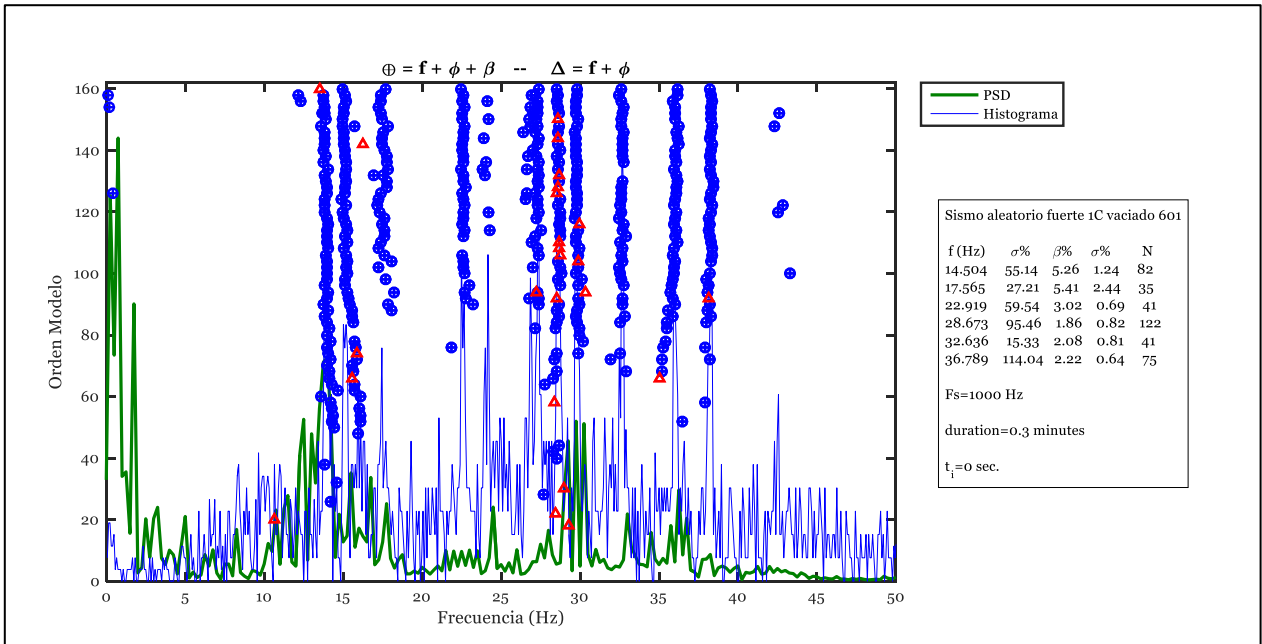


Figura 9.25. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

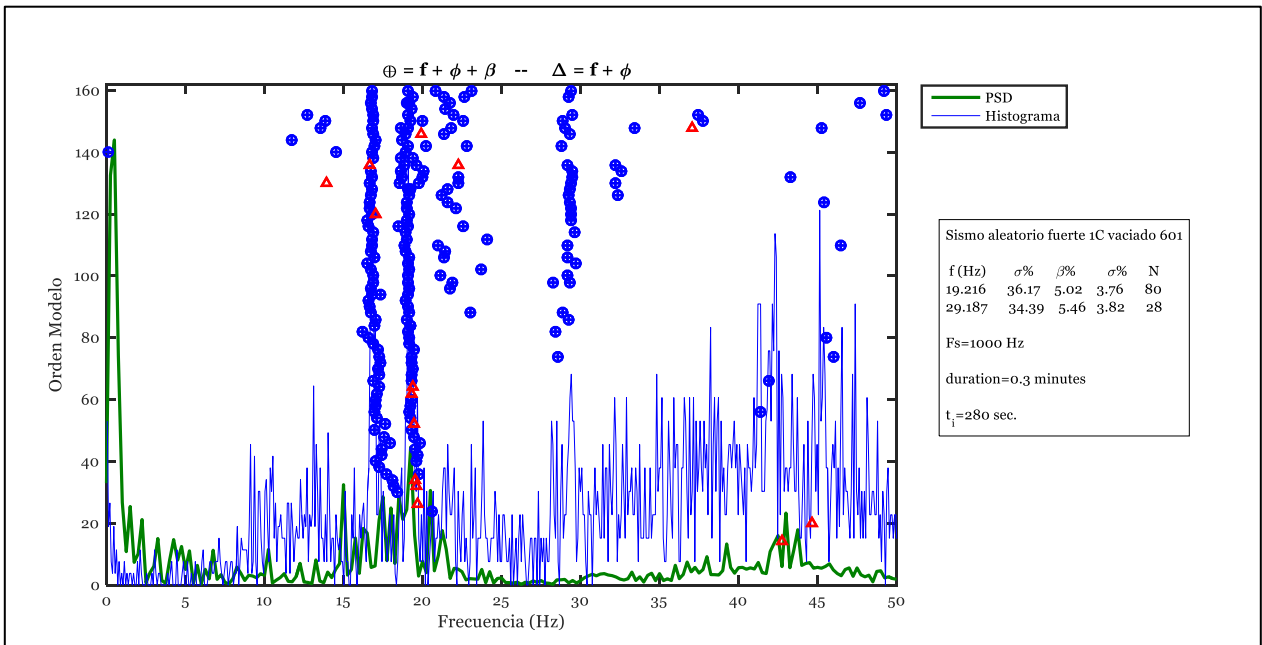


Figura 9.26. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

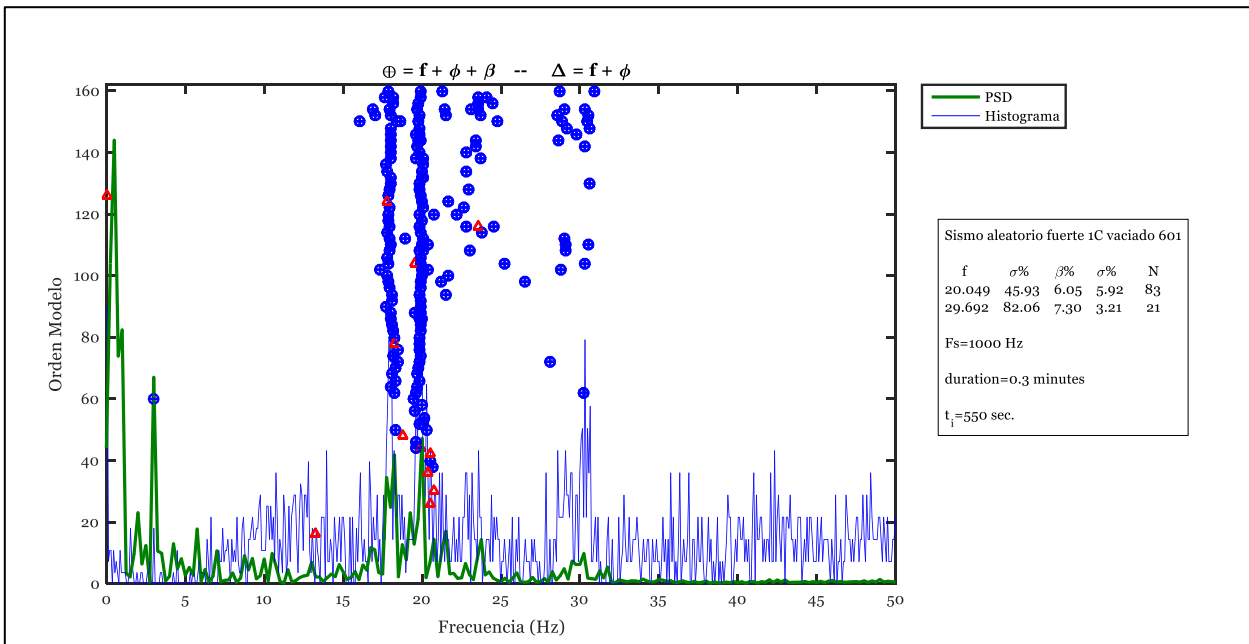


Figura 9.27. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

Tabla 9.64. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4
Frecuencia inicial (Hz)	13,21	15,03	22,67	29,68
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	9	12	12	12
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	90	90	90	90

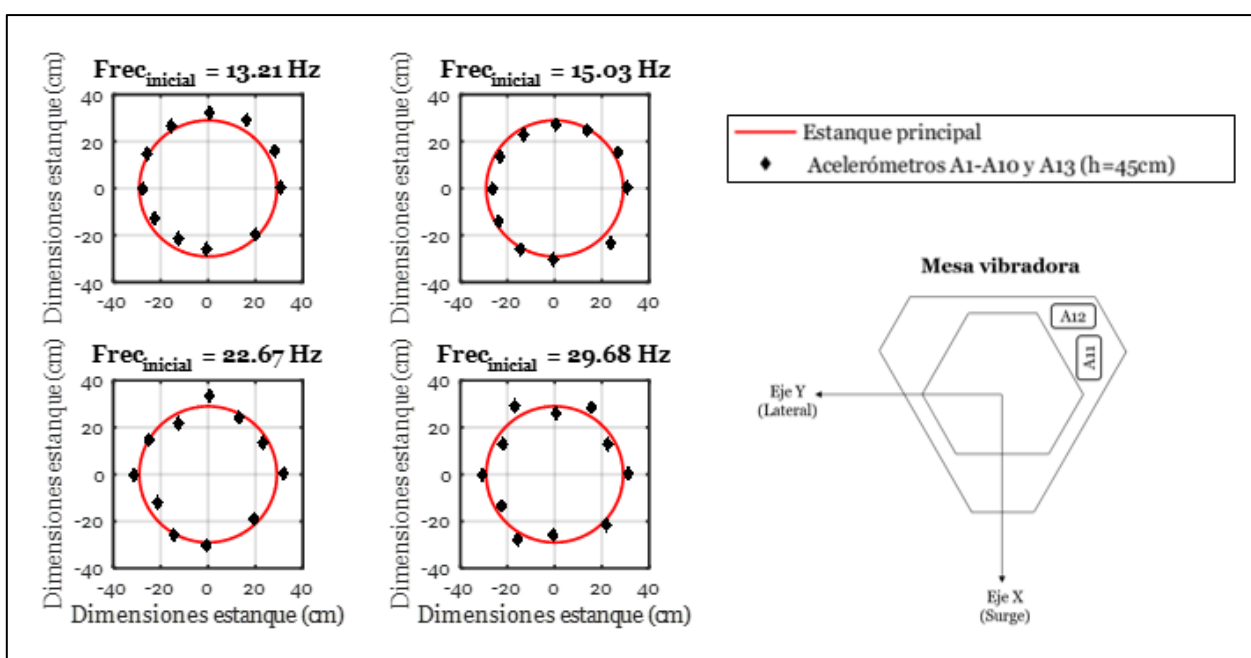


Figura 9.28. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

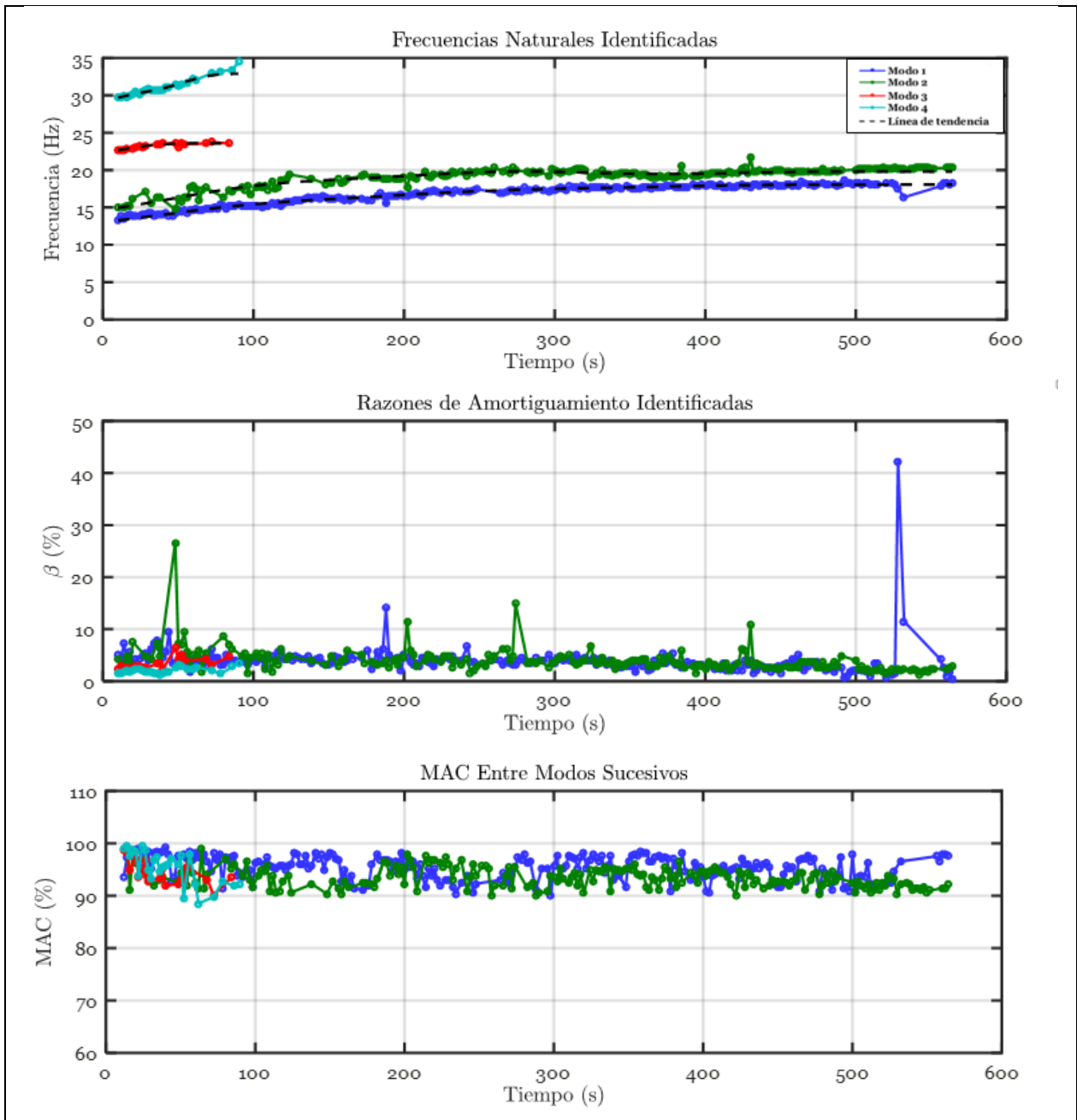


Figura 9.29. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

9.5.2.1.4. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695

Tabla 9.65. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y)
Acelerómetros outputs	A1-A10 y A13
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	232
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	103
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	250
#Ventana 3	218
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	480

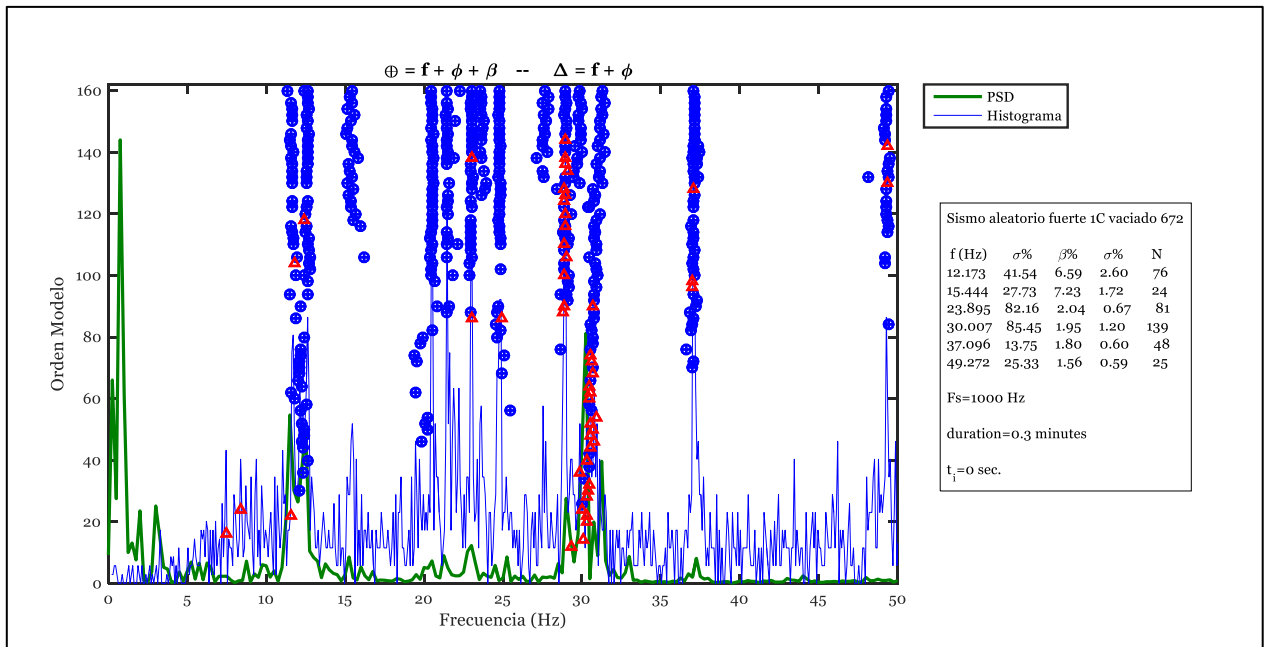


Figura 9.30. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

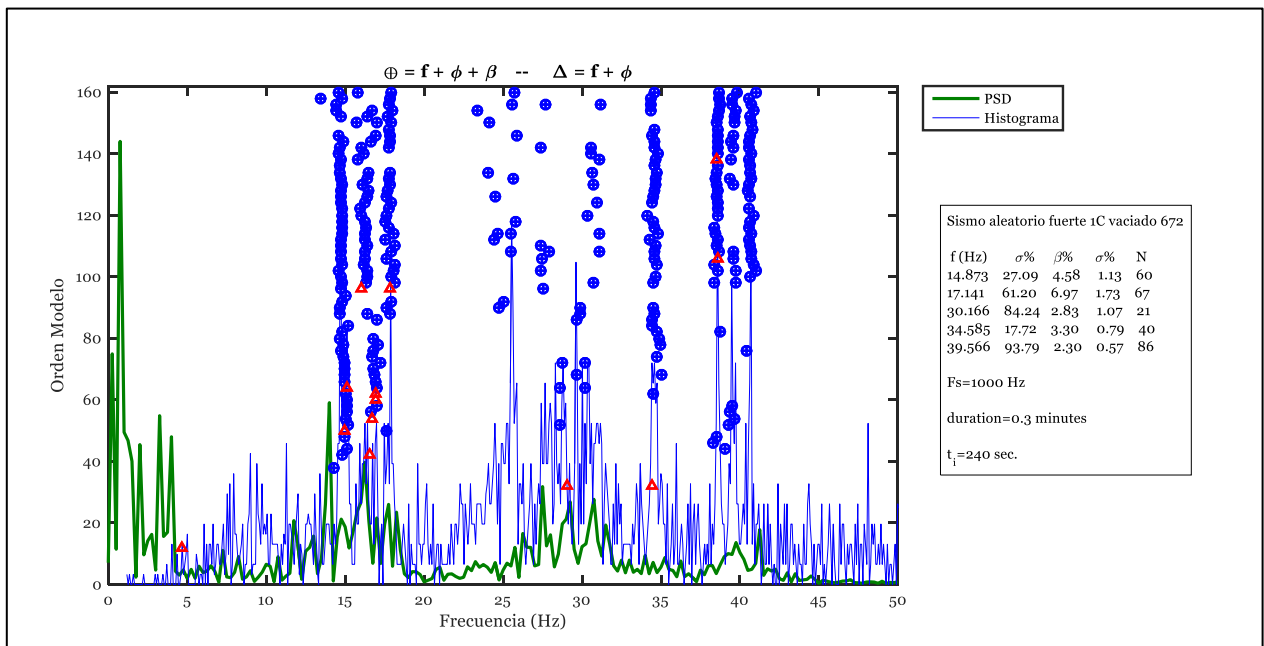


Figura 9.31. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

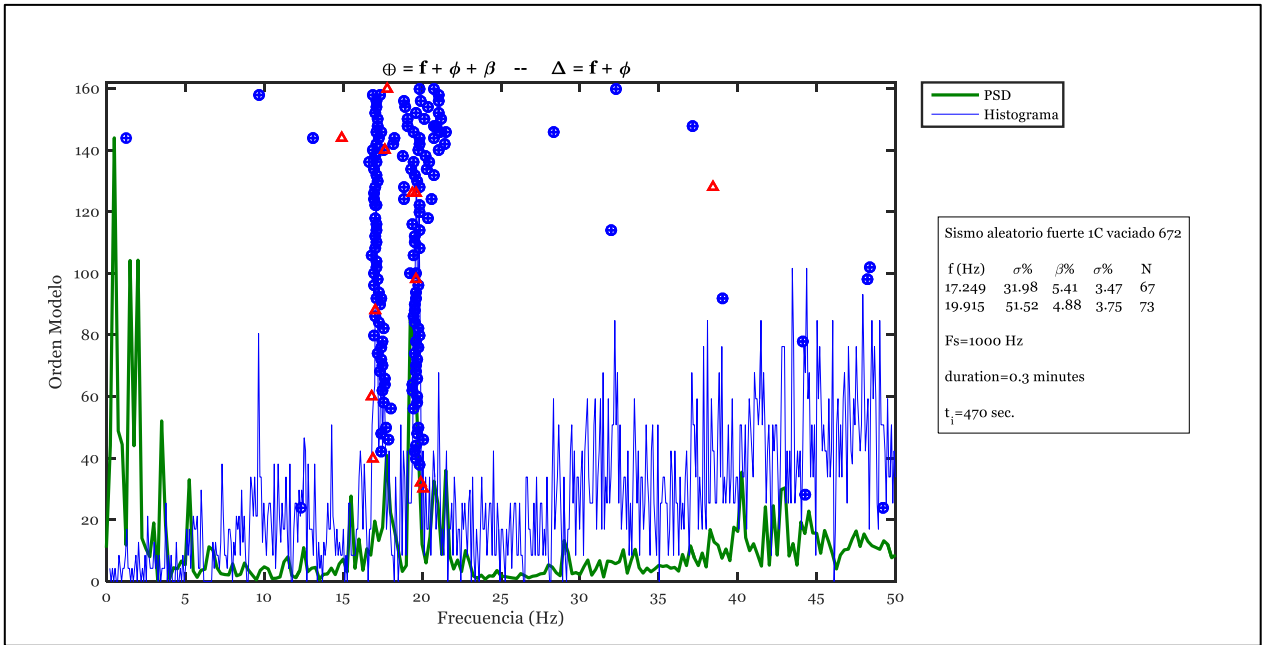


Figura 9.32. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

Tabla 9.66. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4
Frecuencia inicial (Hz)	11,68	12,57	20,47	31,42
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	12	20	9	12
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	85	85	90	85

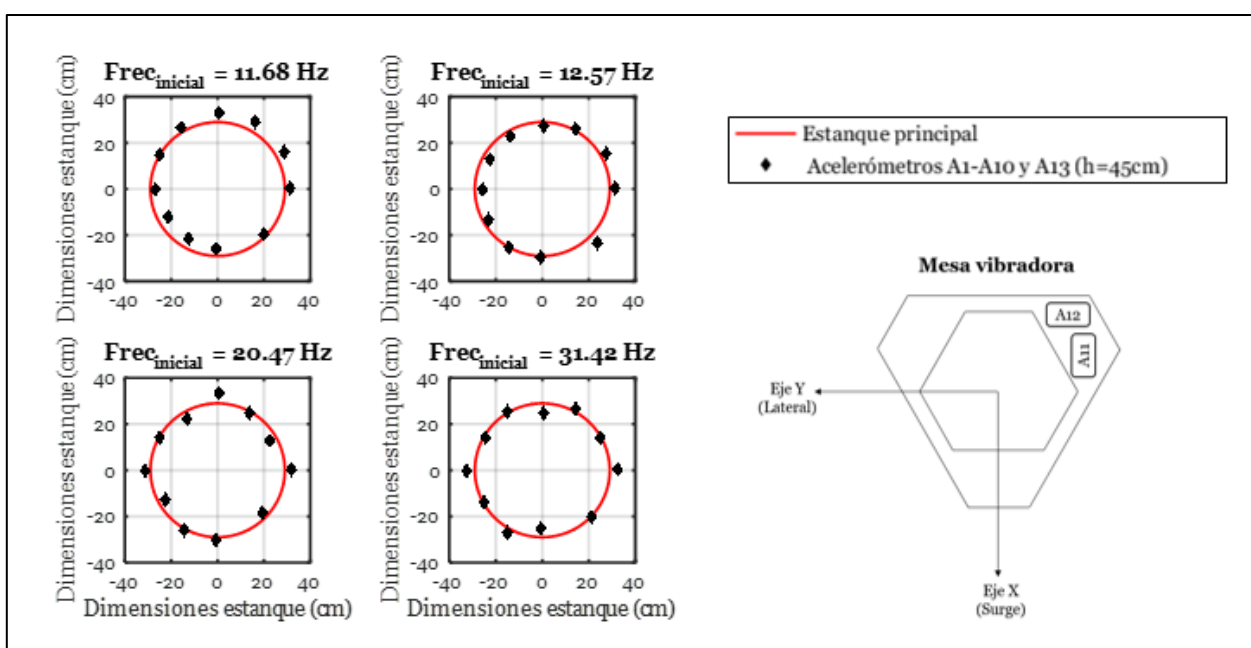


Figura 9.33. Formas modales identificadas inicialmente, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

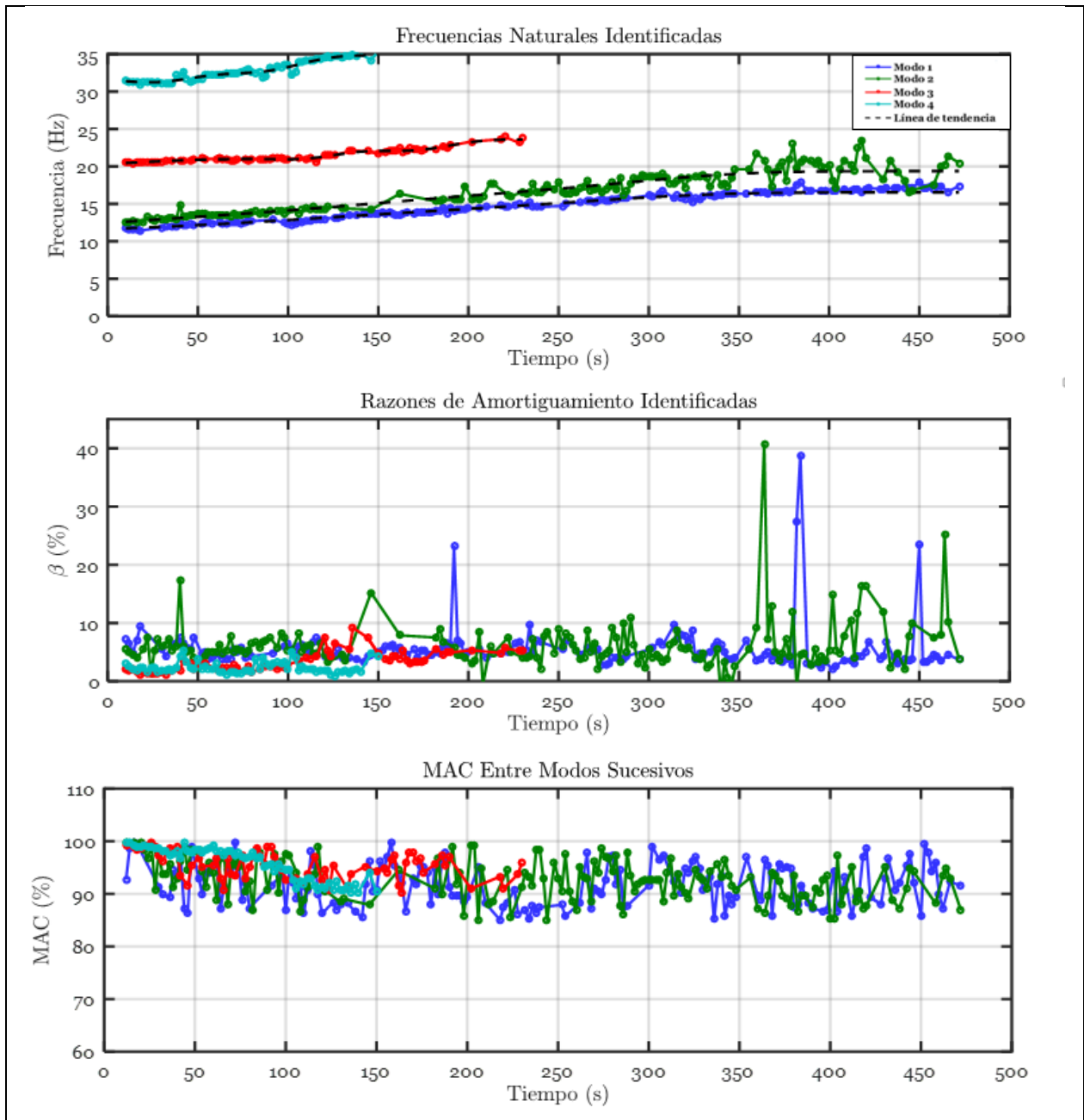


Figura 9.34. Propiedades dinámicas variantes en el tiempo, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

9.5.2.2. Identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo

9.5.2.2.1. Altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691

Tabla 9.67. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	281
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	116
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	280
#Ventana 3	256
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	560

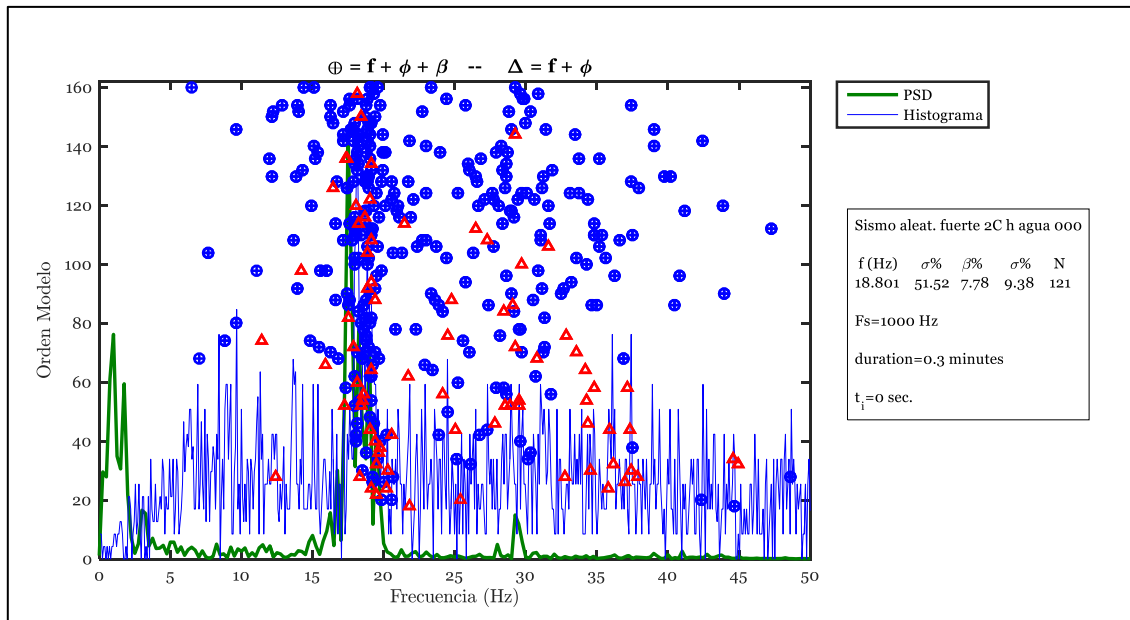


Figura 9.35. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 0$ cm, sismo AF691, registro a02vacio691.

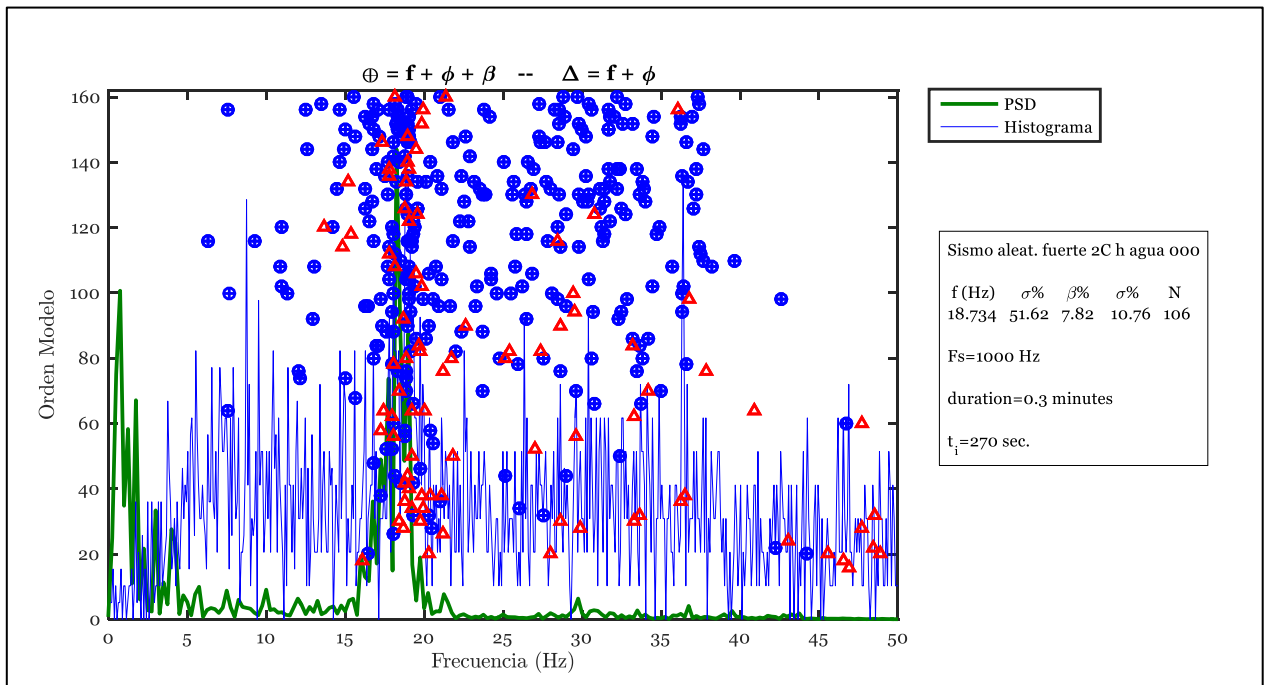


Figura 9.36. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 0$ cm, sismo AF691, registro a02vacio691.

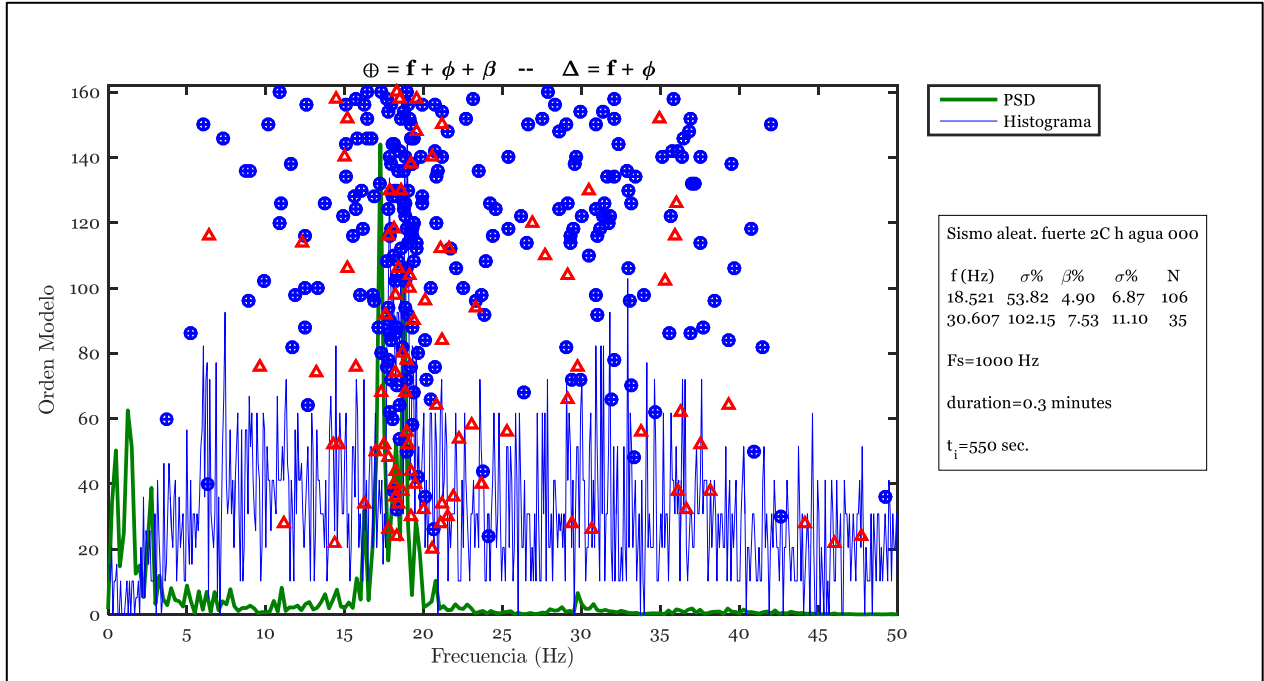


Figura 9.37. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 0$ cm, sismo AF691, registro a02vacio691.

Tabla 9.68. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4
Frecuencia inicial (Hz)	N.I.	19,04	N.I.	N.I.
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	N.I.	90	N.I.	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	N.I.	90	N.I.	N.I.

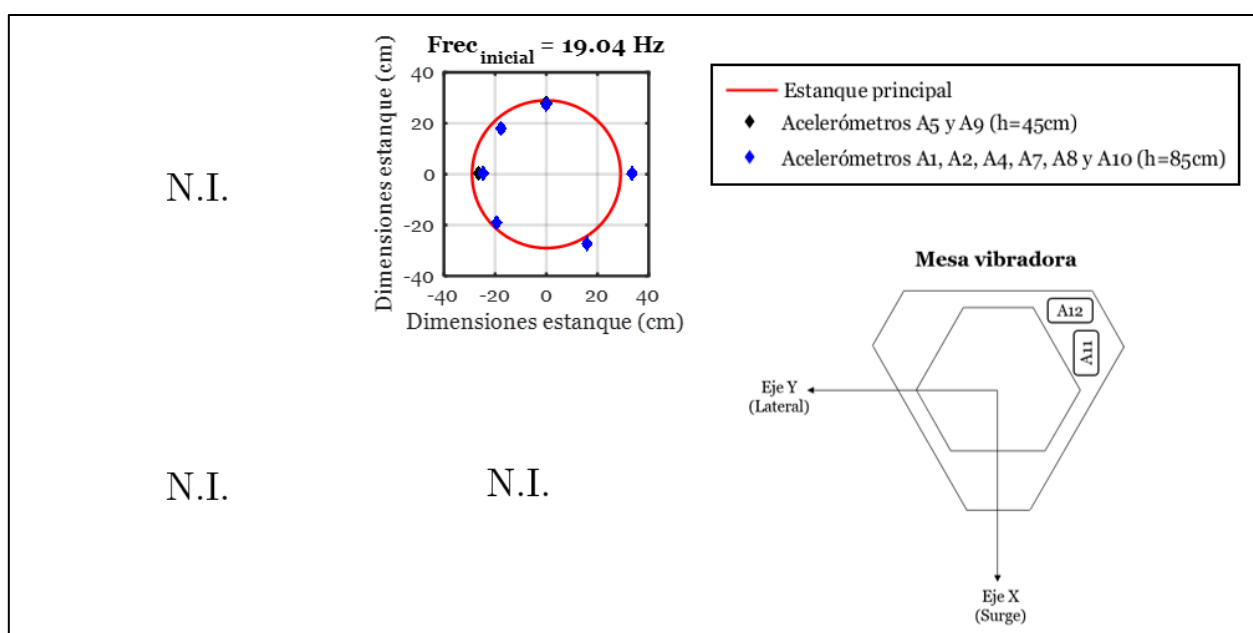


Figura 9.38. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.

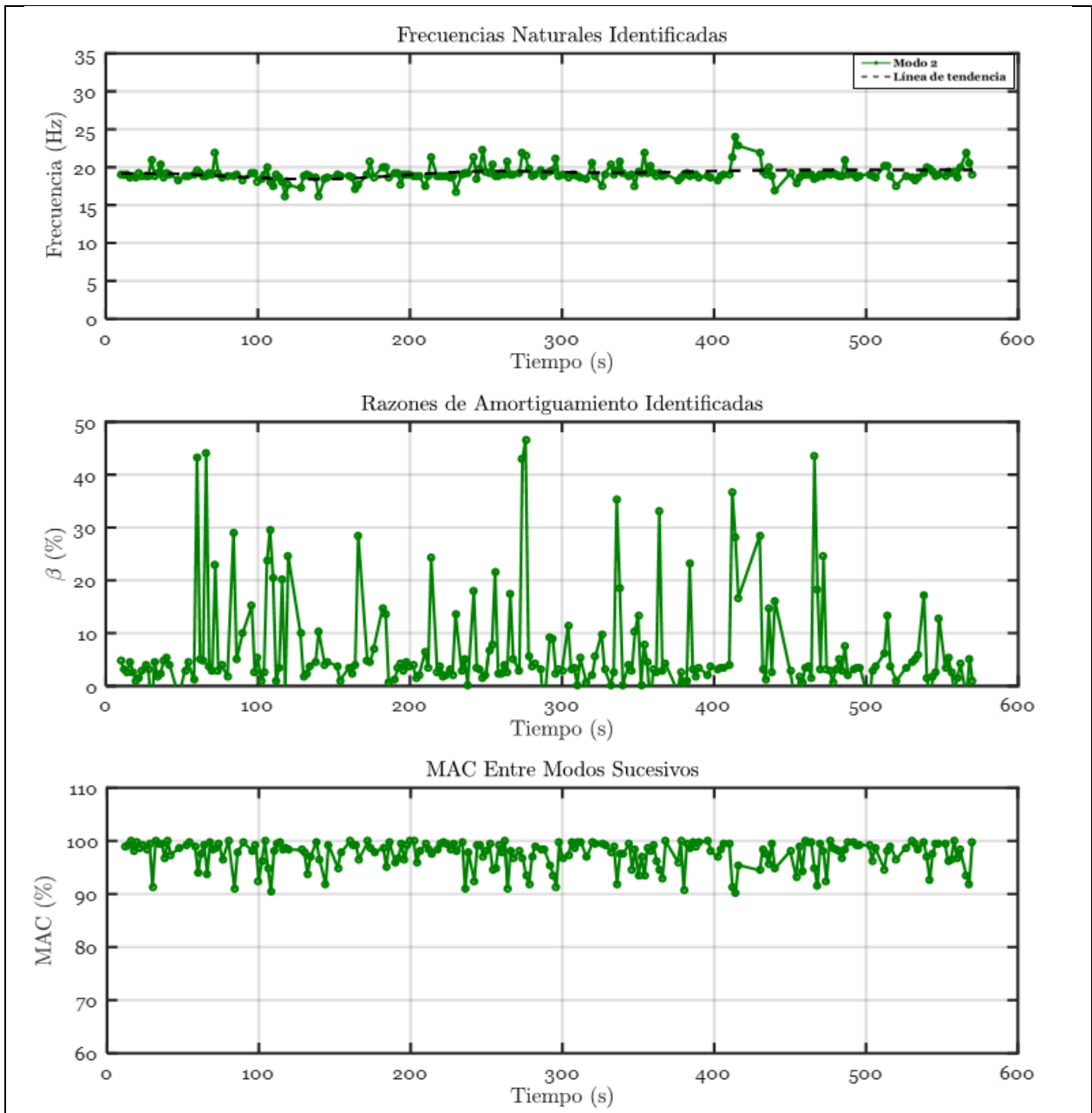


Figura 9.39. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 0 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a02vacio691.

9.5.2.2.2. Altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692

Tabla 9.69. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	283
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	121
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	280
#Ventana 3	261
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	560

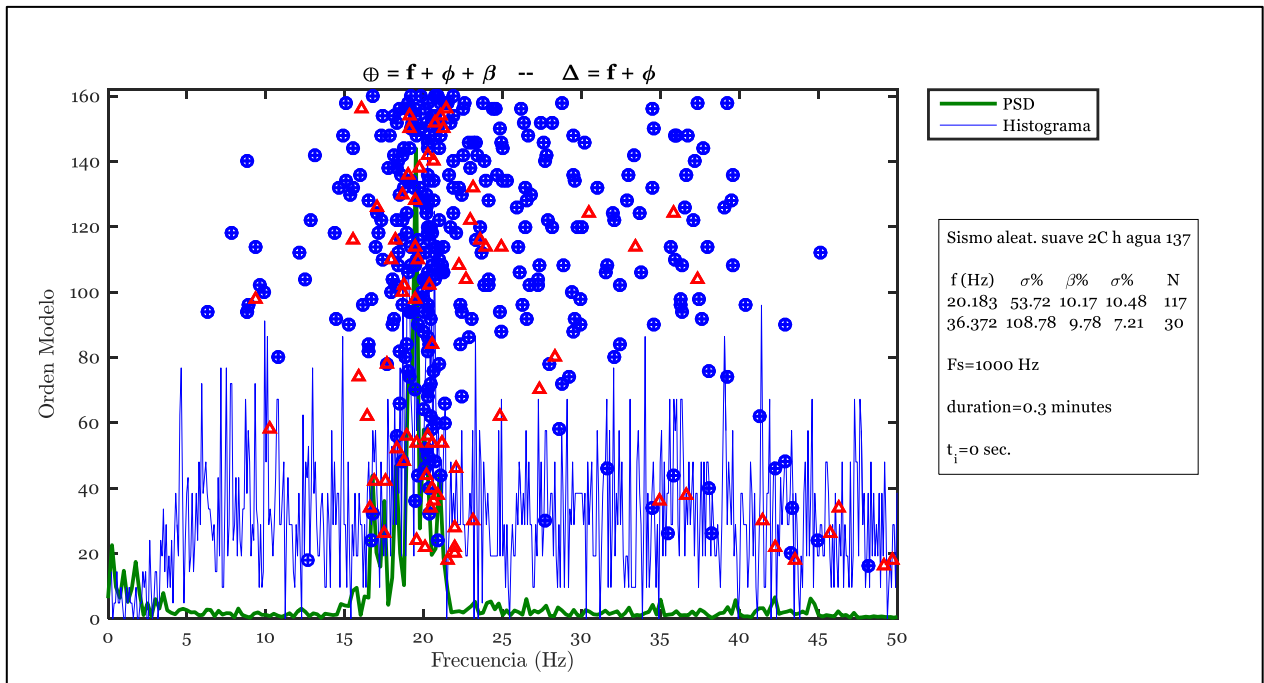


Figura 9.40. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 13,7$ cm, sismo AS692, registro a14suave137.

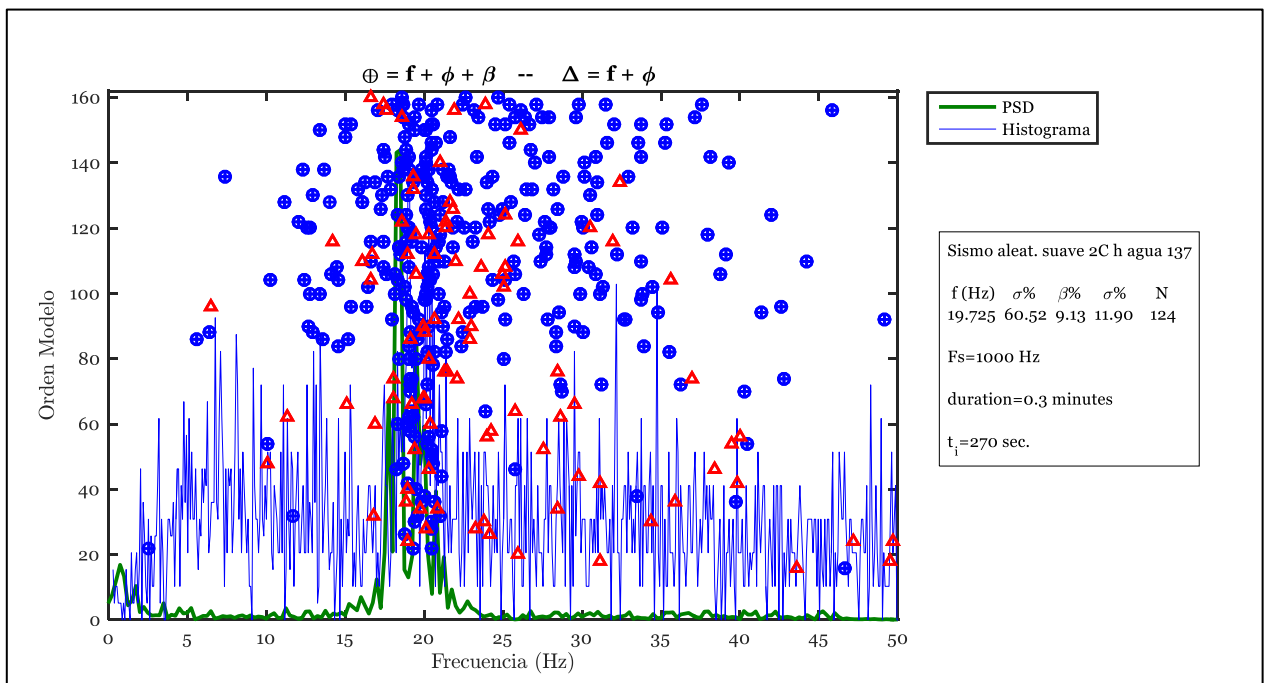


Figura 9.41. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 13,7$ cm, sismo AS692, registro a14suave137.

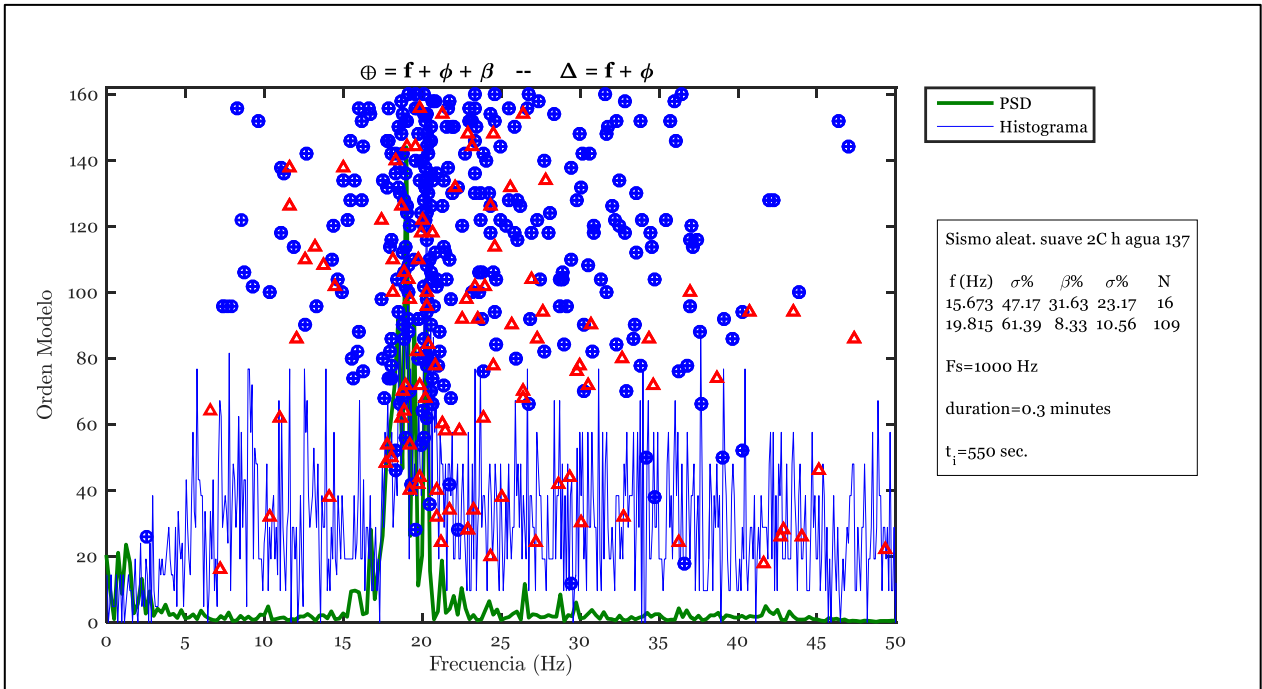


Figura 9.42. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 13,7$ cm, sismo AS692, registro a14suave137.

Tabla 9.70. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4
Frecuencia inicial (Hz)	19,20	20,43	N.I.	N.I.
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	8	5	N.I.	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	90	98	N.I.	N.I.

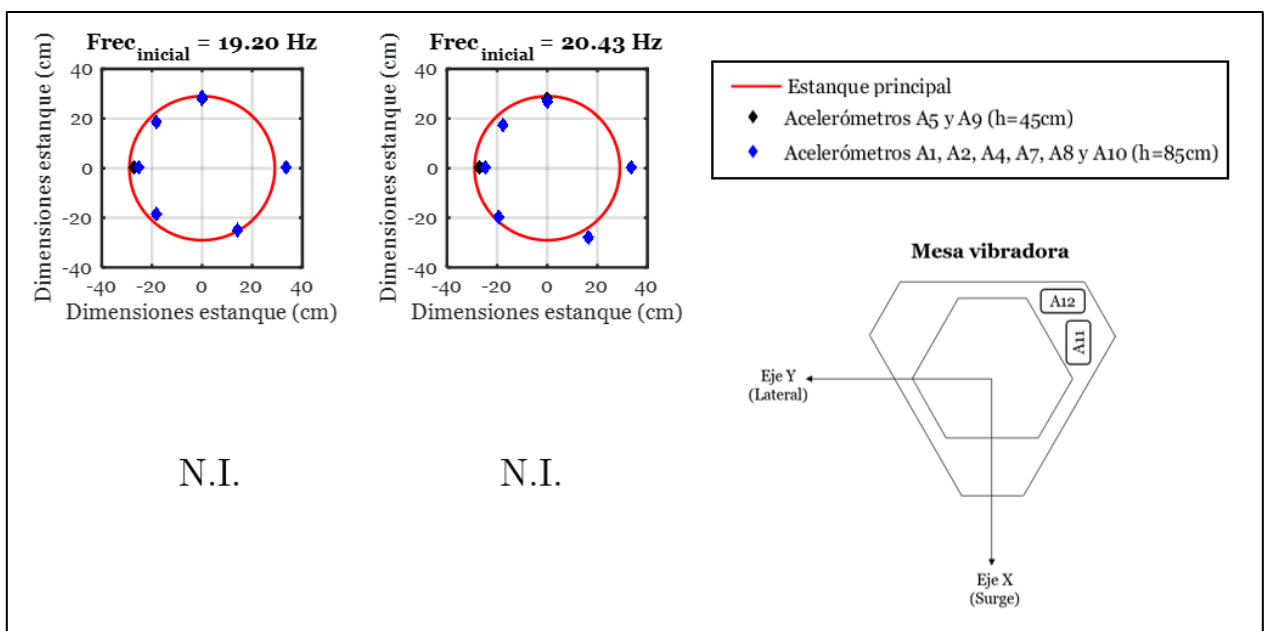


Figura 9.43. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.

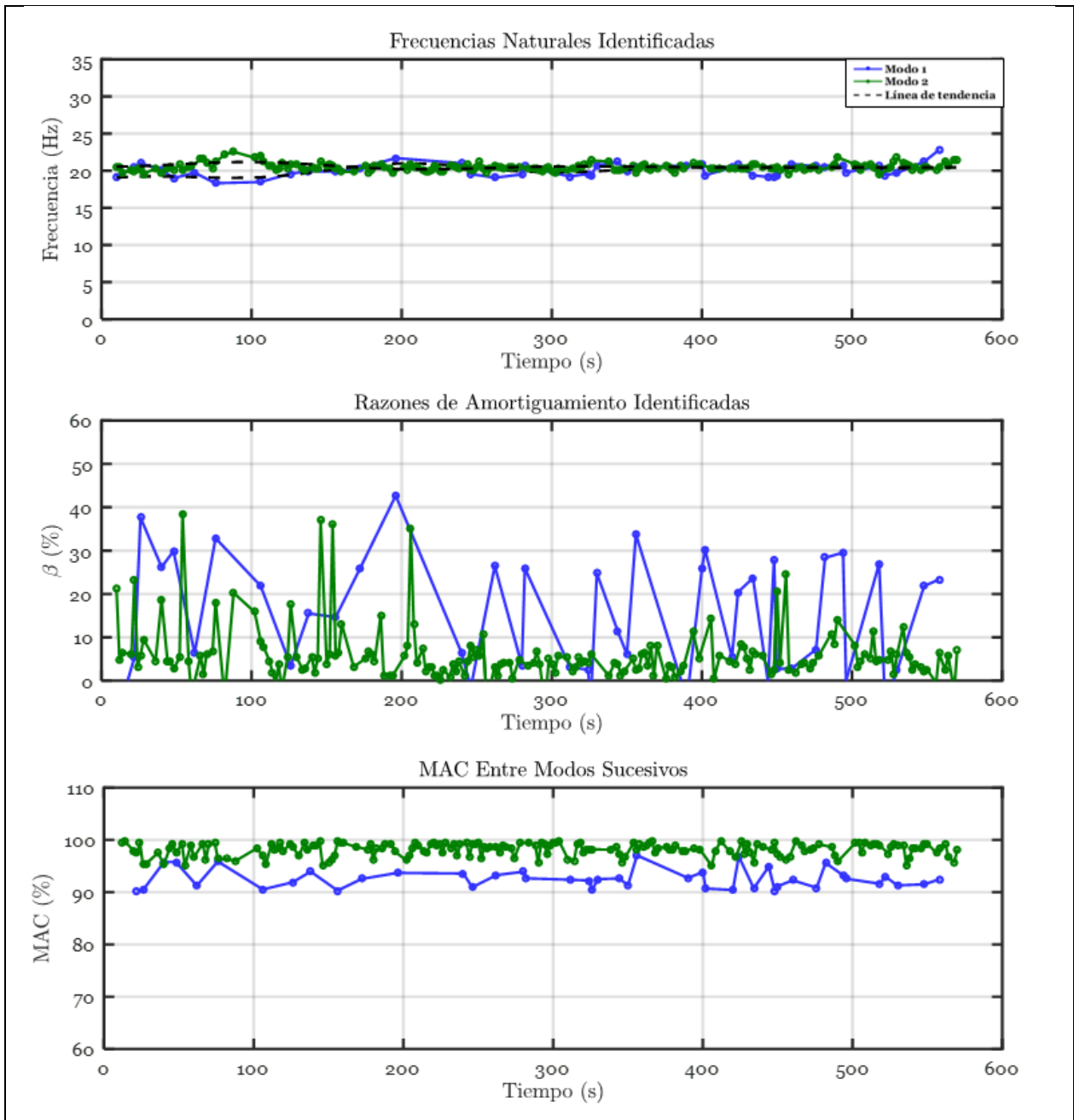


Figura 9.44. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 13,7 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a14suave137.

9.5.2.2.3. Altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS.

Tabla 9.71. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	71
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	21
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	80
#Ventana 3	51
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	140

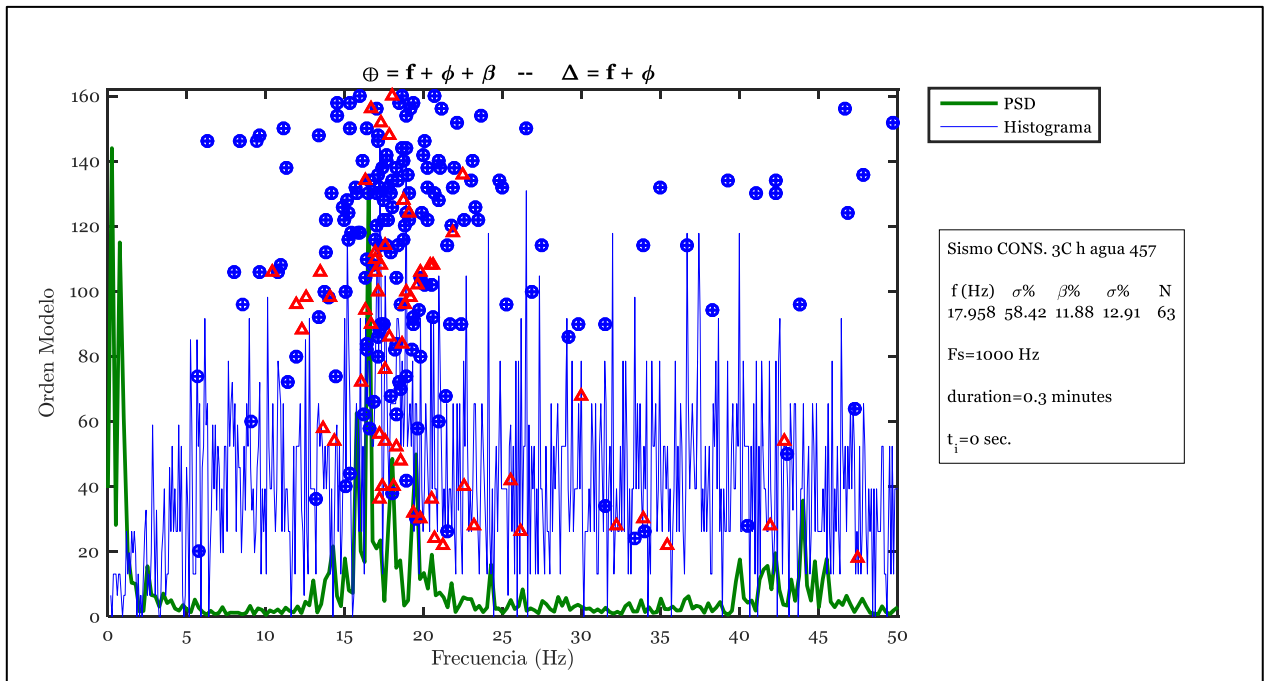


Figura 9.45. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 45,7$ cm, sismo CONS., registro a22constitucion457.

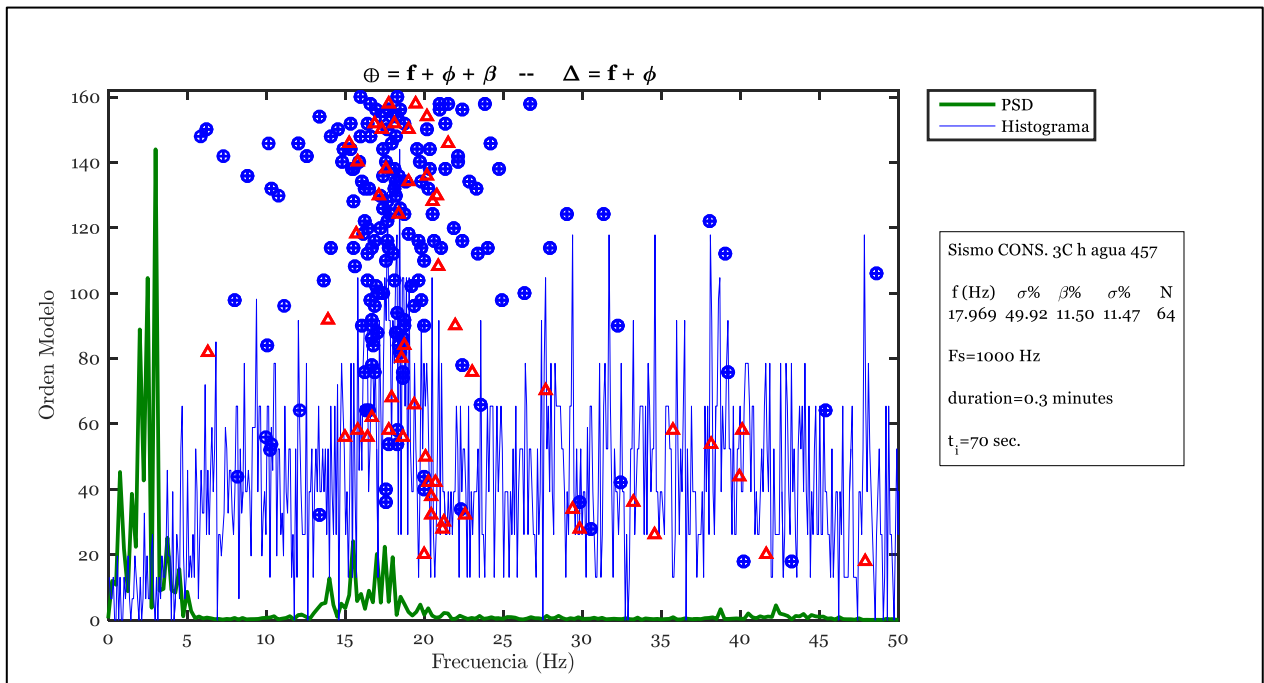


Figura 9.46. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 45,7$ cm, sismo CONS., registro a22constitucion457.

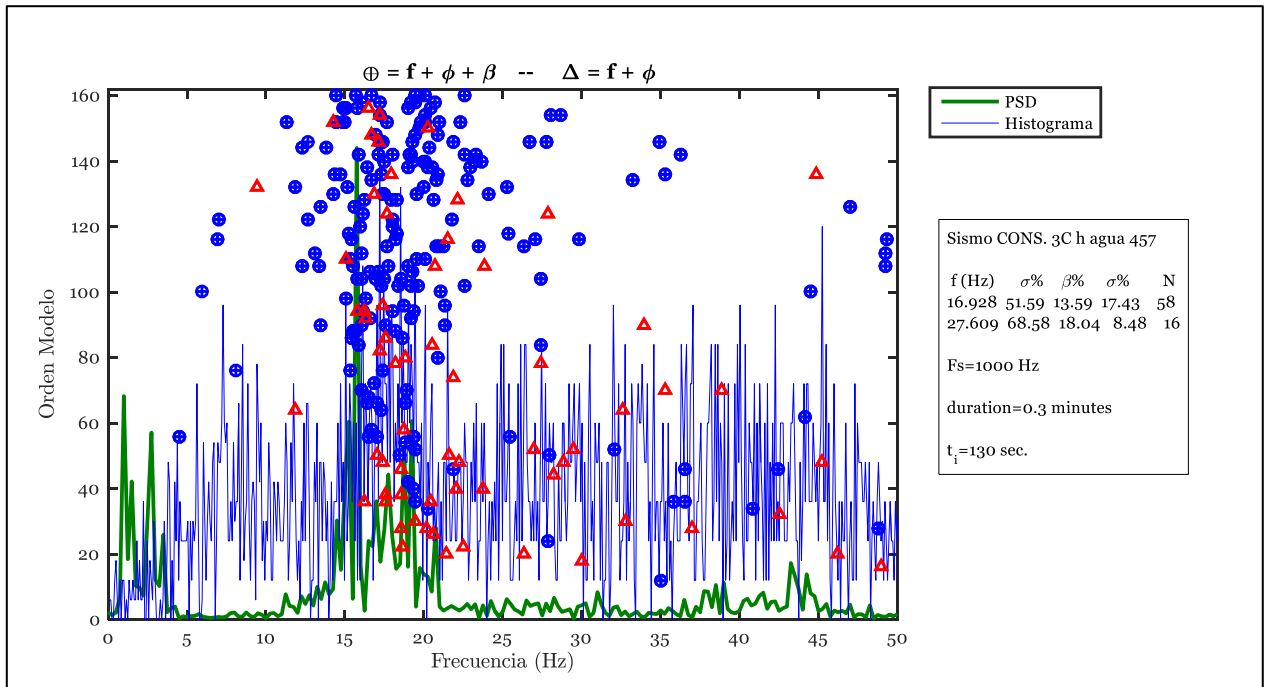


Figura 9.47. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 45,7$ cm, sismo CONS., registro a22constitucion457.

Tabla 9.72. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4
Frecuencia inicial (Hz)	16,37	18,05	N.I.	N.I.
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	90	90	N.I.	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	90	90	N.I.	N.I.

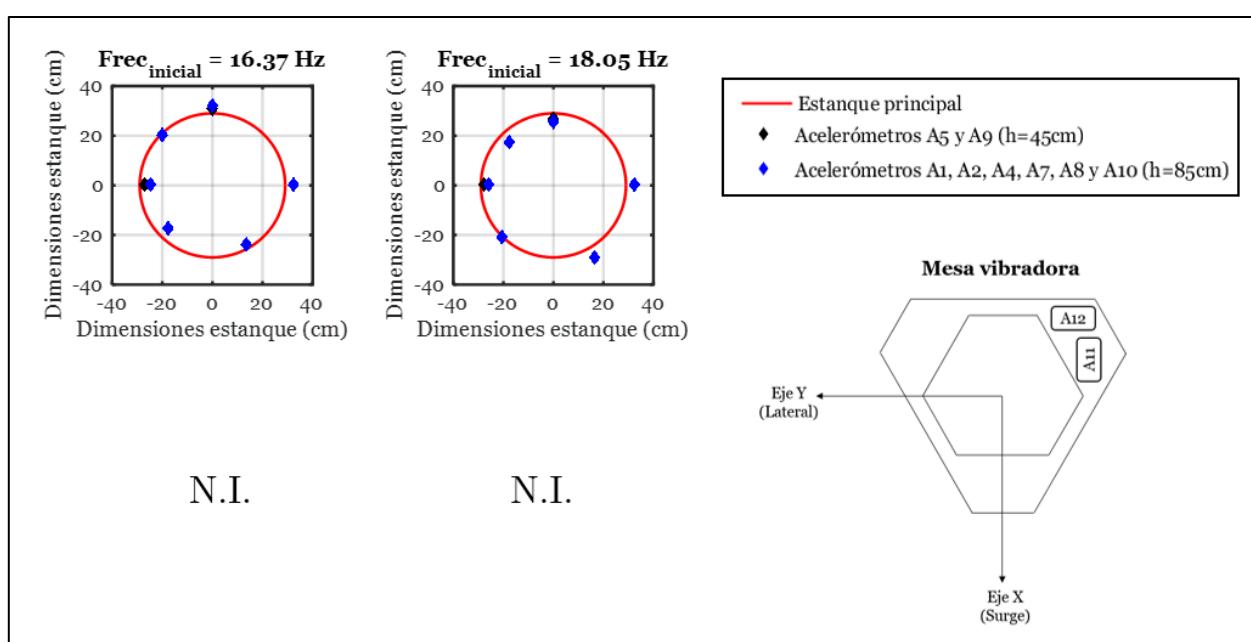


Figura 9.48. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.

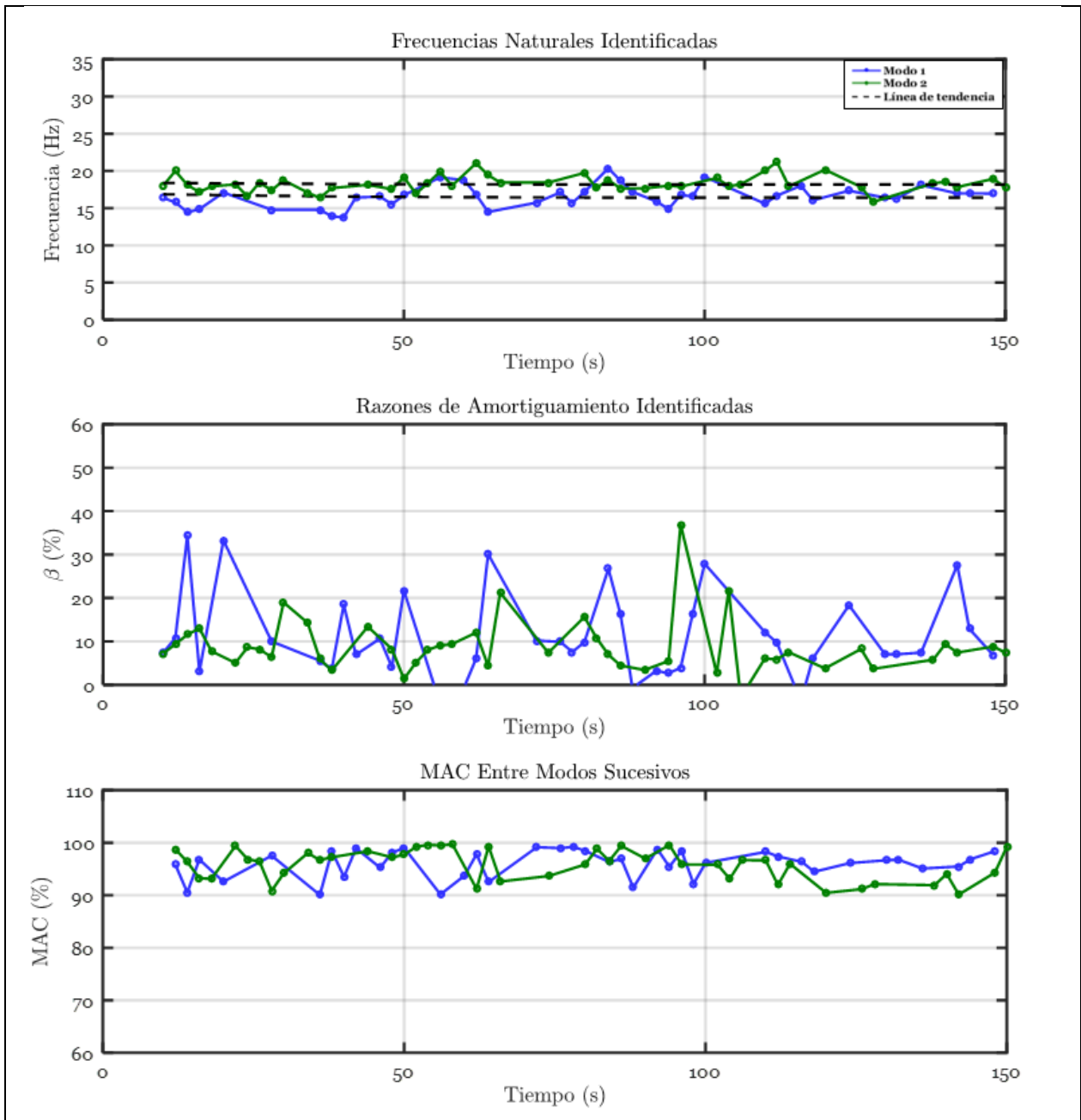


Figura 9.49. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 45,7 \text{ cm}$, sismo CONS., registro a22constitucion457.

9.5.2.2.4. Altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692

Tabla 9.73. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	95%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	561
#Ventana 1	1
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	10
#Ventana 2	248
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	280
#Ventana 3	538
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	570

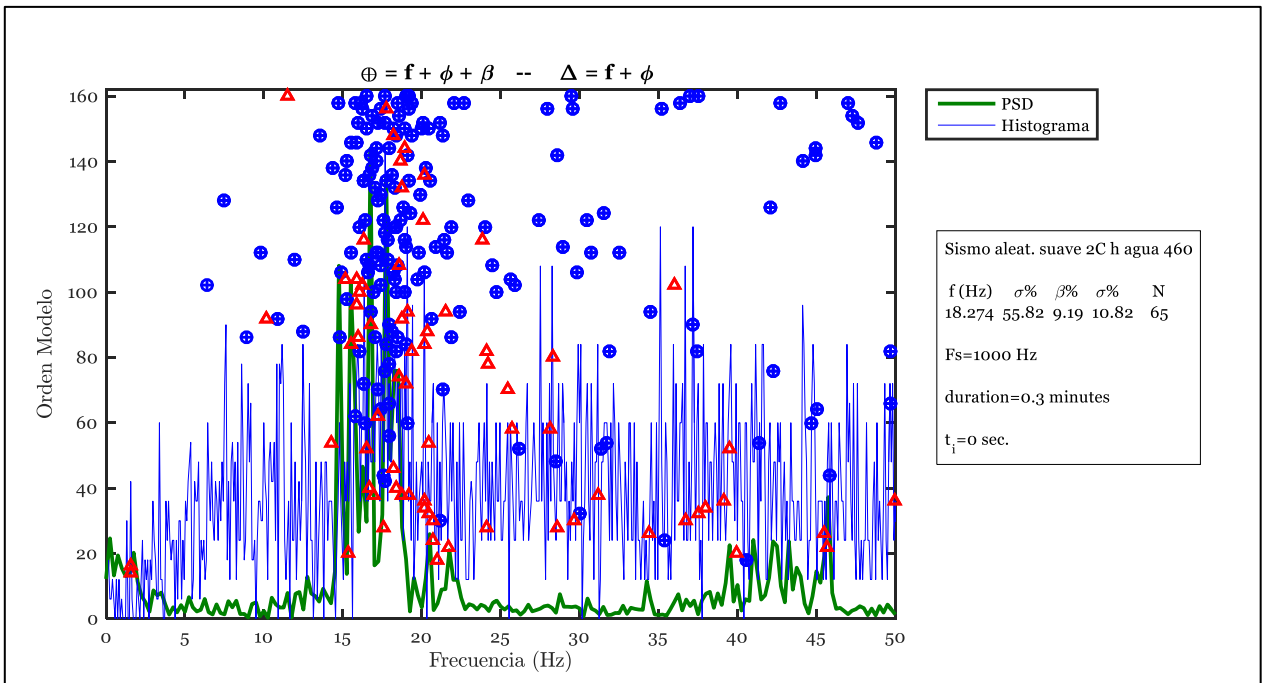


Figura 9.50. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.

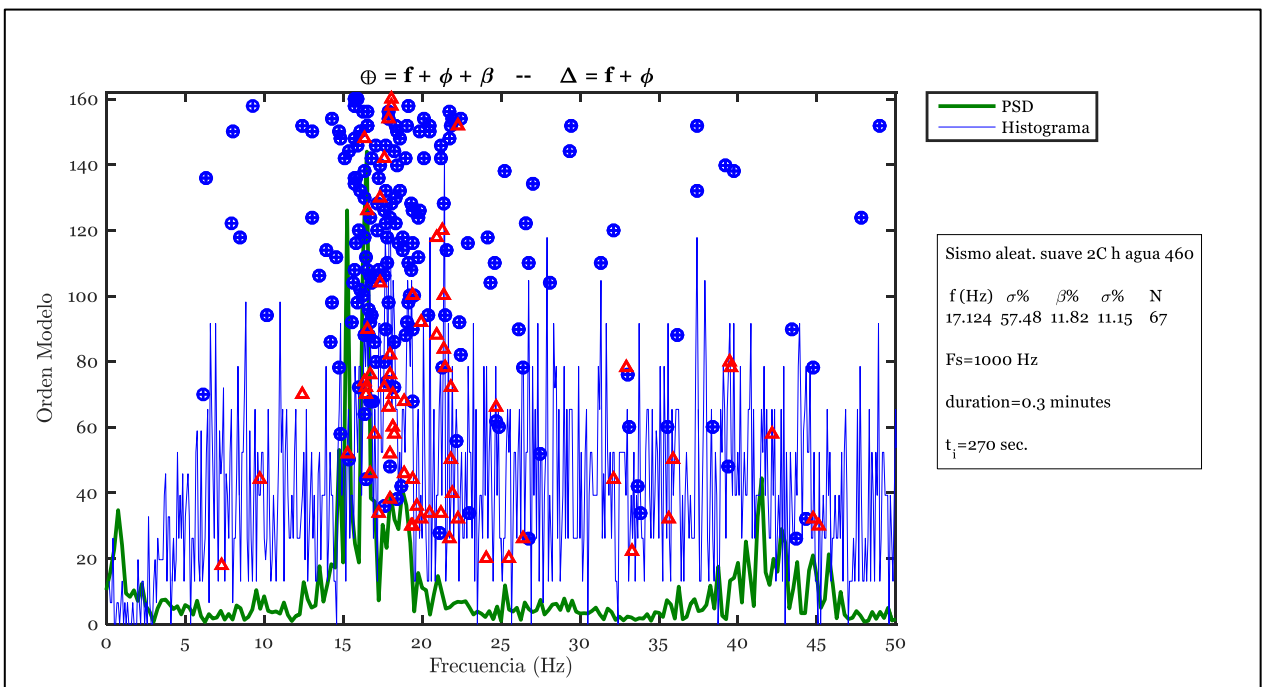


Figura 9.51. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.

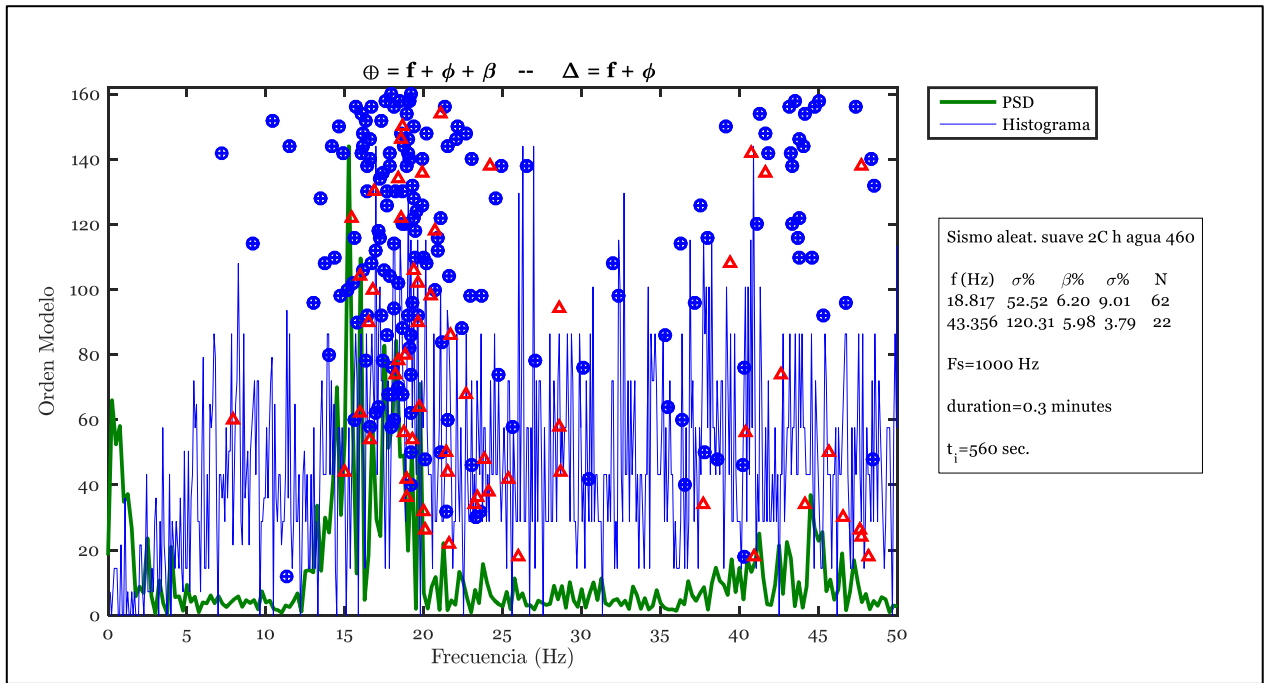


Figura 9.52. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.

Tabla 9.74. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4
Frecuencia inicial (Hz)	15,91	19,69	N.I.	N.I.
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	8	8	N.I.	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	90	90	N.I.	N.I.

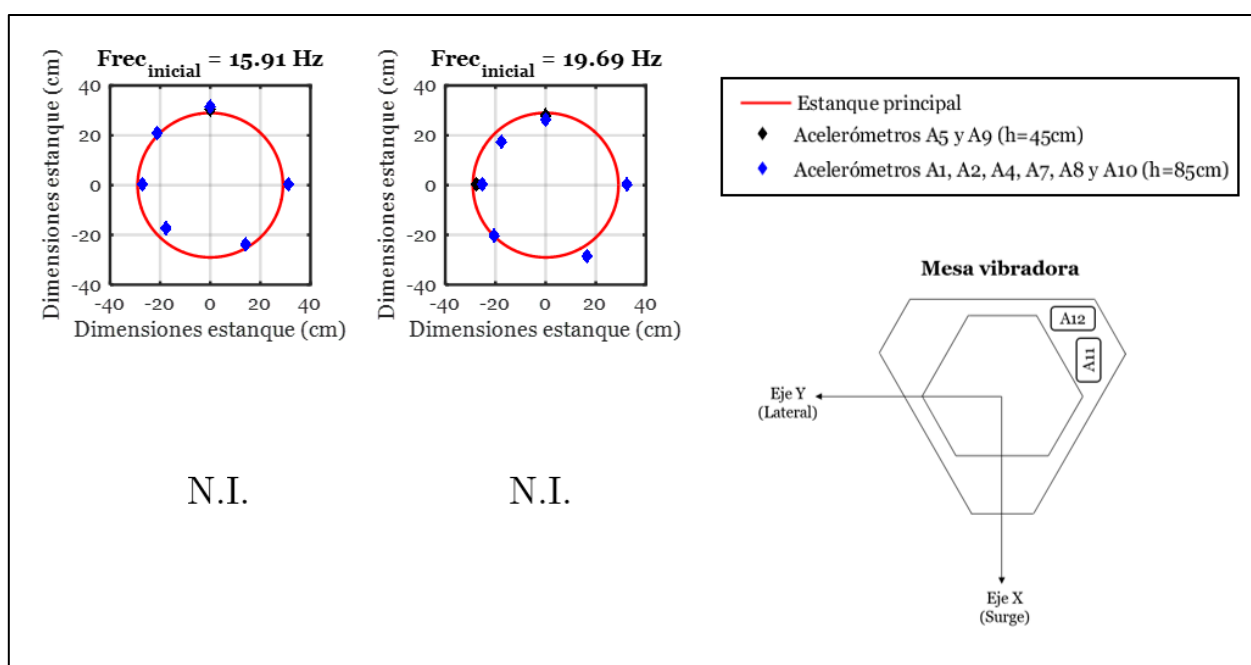


Figura 9.53. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.

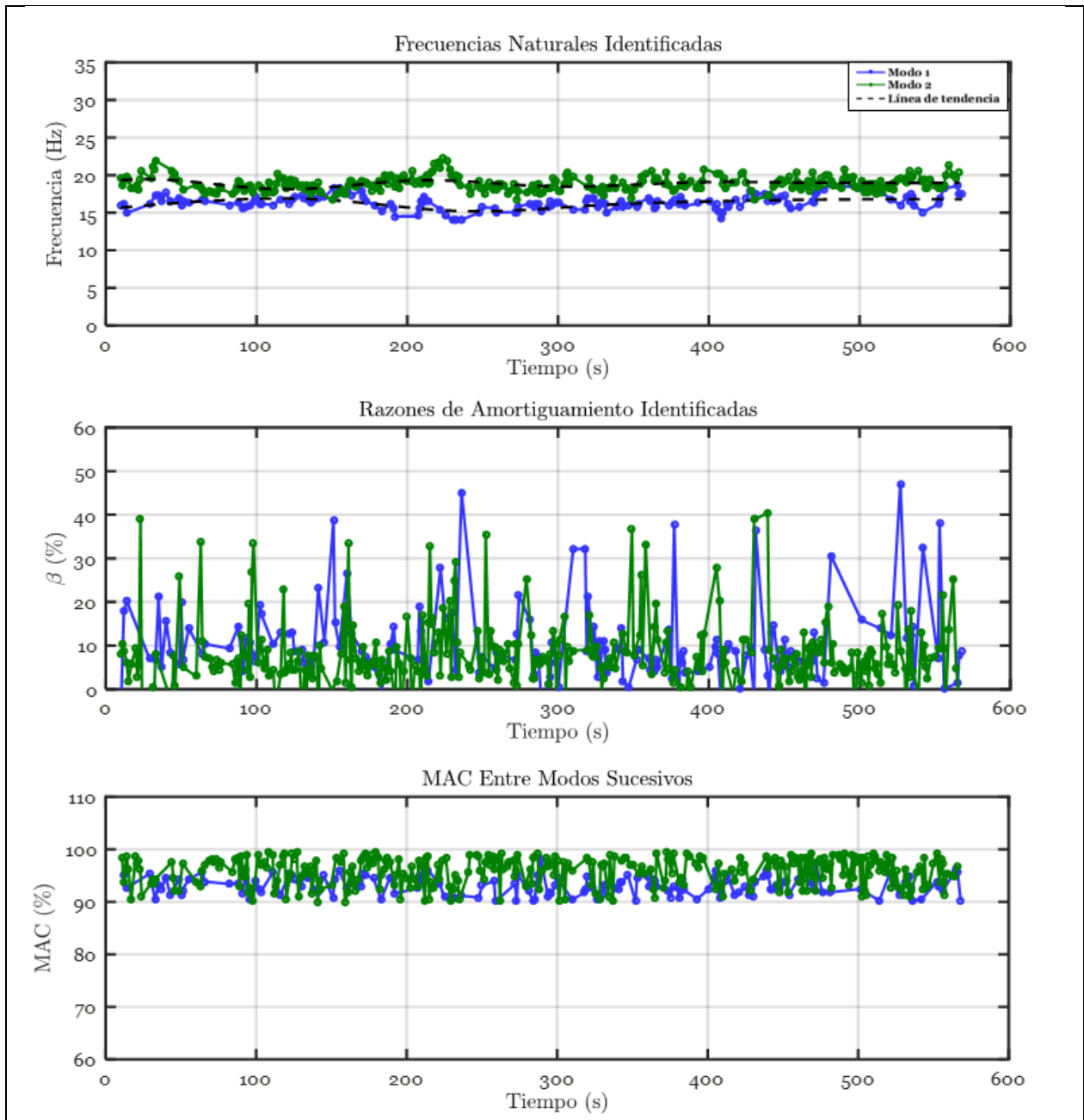


Figura 9.54. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 46,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a18suave460.

9.5.2.2.5. Altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692

Tabla 9.75. Parámetros para diagrama de estabilidad en la identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.

Parámetro	Asignación
Acelerómetros inputs	A3 (Eje Y) y A6 (Eje X)
Acelerómetros outputs	A1, A2, A4, A5, A7, A8, A9, A10
GDL o n'	80
Frecuencia de muestreo de registro (Hz)	1000
Criterio de similitud en frecuencias, cf (%)	6
Criterio de similitud en amortiguamiento, cam (%)	10
Criterio de similitud en MAC, cm (%)	12
Smin	20000
Traslapo (% de Smin)	90%
Duración de la ventana de tiempo (s)	20
Cantidad de ventanas	281
#Ventana 1	116
Tiempo de ubicación de la ventana 1 (s)	290
#Ventana 2	121
Tiempo de ubicación de la ventana 2 (s)	300
#Ventana 3	256
Tiempo de ubicación de la ventana 3 (s)	570

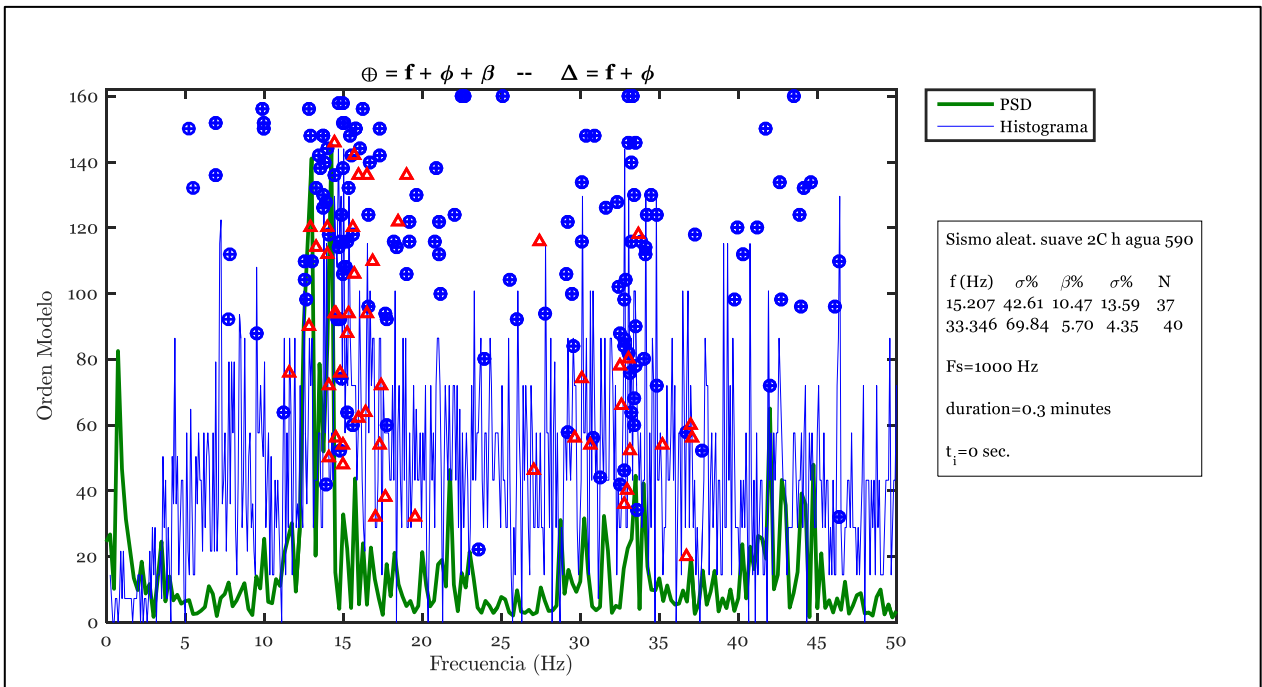


Figura 9.55. Diagrama de estabilidad para la ventana 1, altura de agua constante $h = 59,0$ cm, sismo AS692, registro a04suave590.

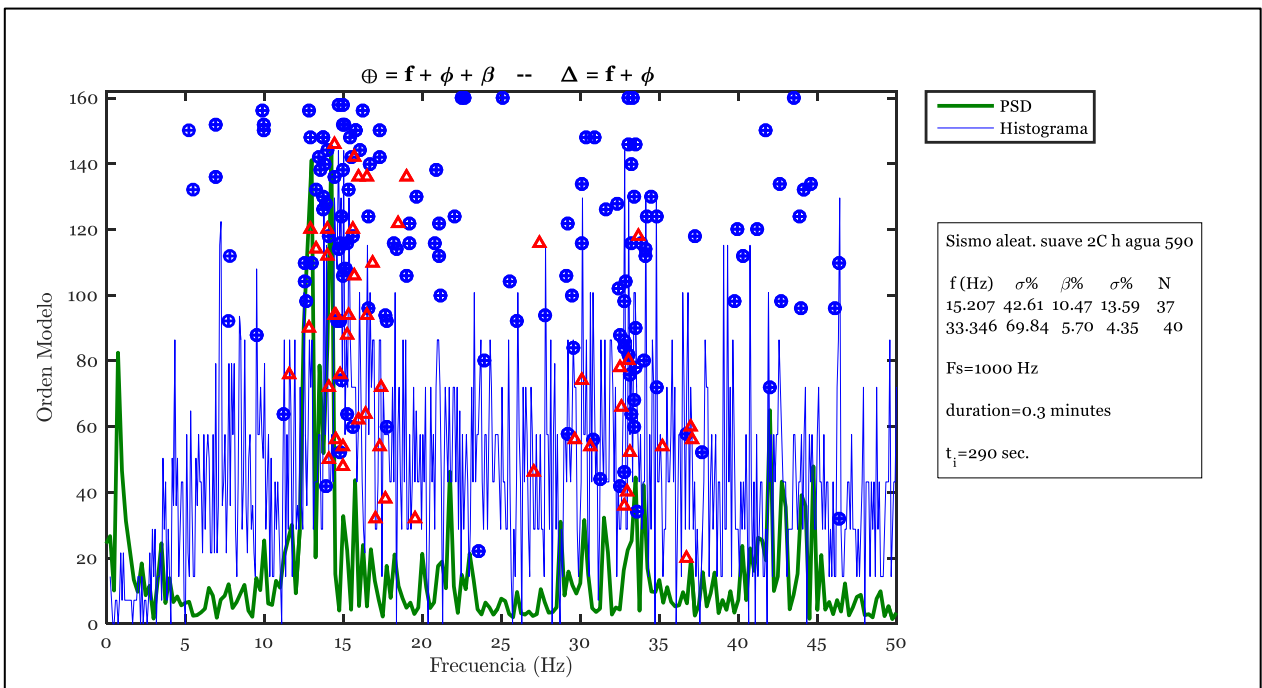


Figura 9.56. Diagrama de estabilidad para la ventana 2, altura de agua constante $h = 59,0$ cm, sismo AS692, registro a04suave590.

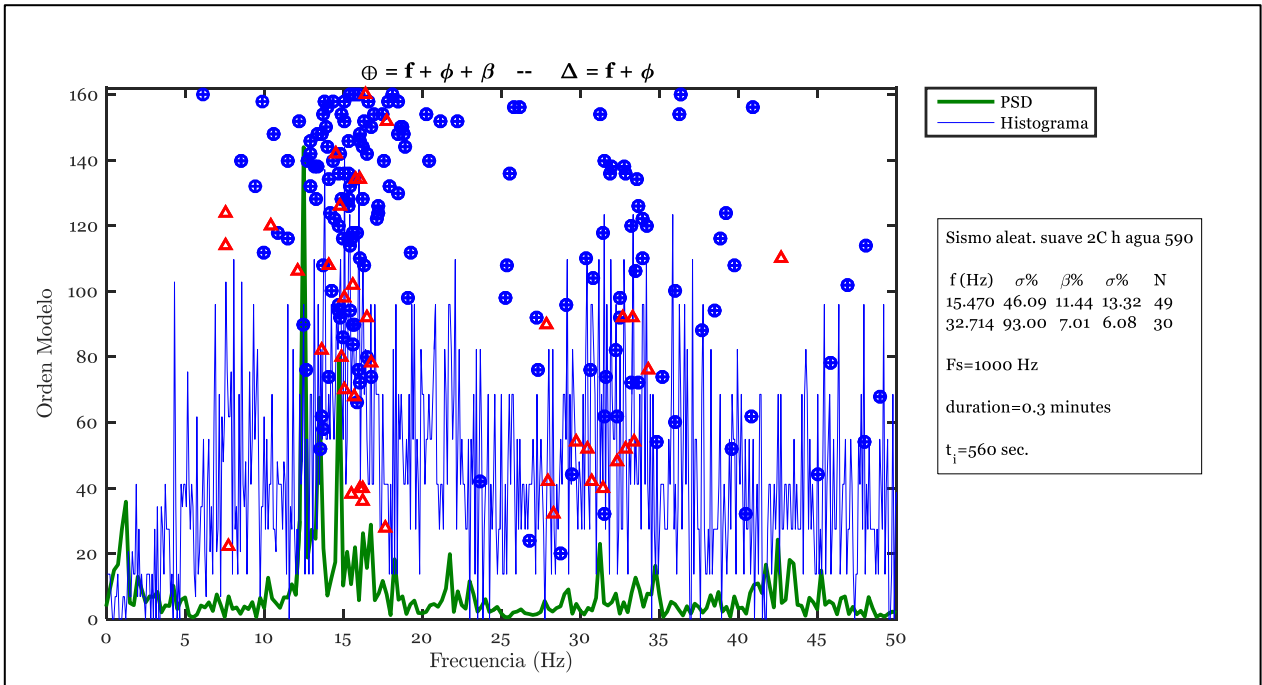


Figura 9.57. Diagrama de estabilidad para la ventana 3, altura de agua constante $h = 59,0$ cm, sismo AS692, registro a04suave590.

Tabla 9.76. Parámetros para identificación de propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.

Parámetro	Modo	Modo	Modo	Modo
	1	2	3	4
Frecuencia inicial (Hz)	15,50	14,45	N.I.	N.I.
Criterio de similitud de frecuencias en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cff (%)	90	92	N.I.	N.I.
Criterio de similitud en MAC en identificación de frecuencias para pequeñas ventanas, cmac (%)	90	90	N.I.	N.I.

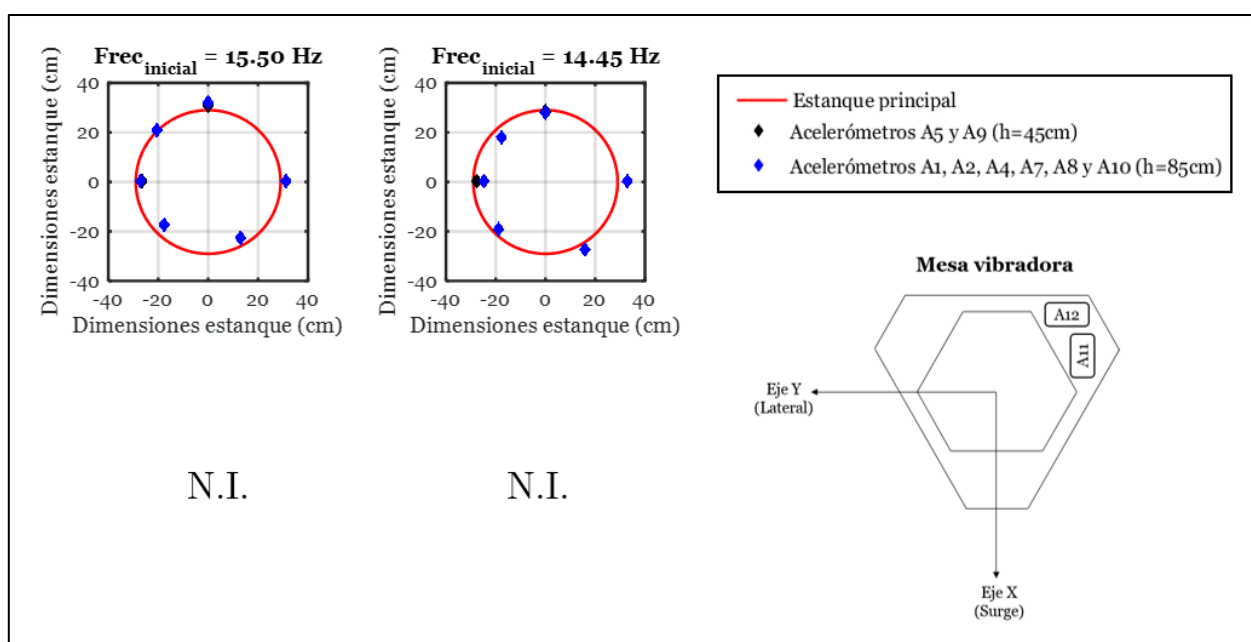


Figura 9.58. Formas modales identificadas inicialmente, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.

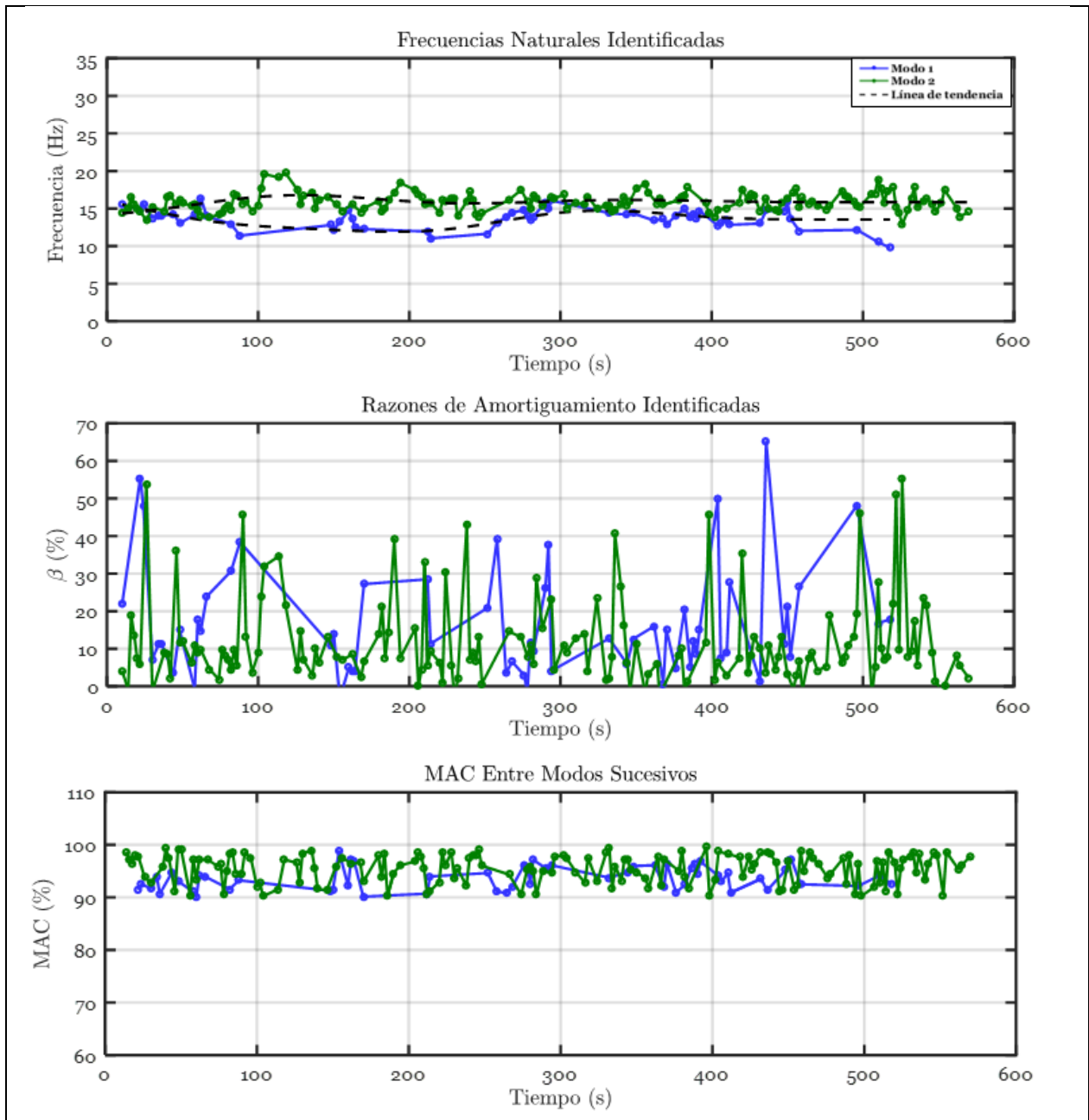


Figura 9.59. Propiedades dinámicas invariantes en el tiempo, altura de agua constante $h = 59,0 \text{ cm}$, sismo AS692, registro a04suave590.

9.5.2.3. Identificación de propiedades dinámicas en función de la altura de agua

Las siguientes tablas muestran las frecuencias identificadas a determinadas alturas al aplicar el método DSI, para cada registro. La cuales se les hace el nexa con el tiempo que demora la altura de agua al pasar por determinado nivel.

Posteriormente, las frecuencias que pertenecen al mismo modo y altura son promediadas, construyendo así la Tabla 6.11.

Tabla 9.77. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro a12vaciado731.

Parámetros				Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
h_{agua} (cm)	Vol (lts)	t_{general} (s)	t_{registro} (s)	Frecuencias (Hz)					
73,1	186,05	0	0	10,45	11,3	20,35	22,61	24,38	29,61
68,3	177	33	33	9,94	12,31	20,70	22,90	24,56	29,50
62,3	161	92	92	9,864	13,97	21,13	23,72	25,60	31,22
60,1	154,7	109	109	10,29	14,8	21,45	24,09	27,02	32,60
55,9	144,4	139	139	11,34	16,3	22,11	25,03	27,85	34,36
50,3	128,6	186	186	13,63	17,92	-	-	29,67	36,97
46,0	118,5	217	217	16,28	18,86	-	-	-	-
40,5	103	268	268	17,12	19,33	-	-	-	-
33,8	86,4	327	327	16,88	20,15	-	-	-	-
31,5	79,45	353	353	16,8	20,21	-	-	-	-
23,0	57,75	440	440	18,31	19,84	-	-	-	-
20,2	49,5	476	476	18,68	19,81	-	-	-	-
13,7	33,75	554	554	18,77	19,82	-	-	-	-

Tabla 9.78. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro a21vaciado623.

Parámetros				Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
h_{agua} (cm)	Vol (lts)	t_{general} (s)	t_{registro} (s)	Frecuencias (Hz)					
62,3	161	92	13,91	13,91	15,38	29,55	22,61	24,38	29,55
60,1	154,7	109	13,78	13,78	15,48	30,08	22,90	24,56	30,08
55,9	144,4	139	14,00	14,00	15,95	29,98	23,72	25,60	29,98
50,3	128,6	186	15,36	15,36	17,44	-	24,09	27,02	-
46,0	118,5	217	16,35	16,35	18,64	-	25,03	27,85	-
40,5	103,0	268	17,14	17,14	19,95	-	-	29,67	-
33,8	86,4	327	17,40	17,40	20,15	-	-	-	-
31,5	79,45	353	17,63	17,63	20,11	-	-	-	-
23,0	57,75	440	18,27	18,27	20,21	-	-	-	-
20,2	49,5	476	18,30	18,30	20,22	-	-	-	-
15,5	40,89	526	18,30	18,30	20,22	-	-	-	-

Tabla 9.79. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b12vaciado603.

Parámetros				Modo1	Modo2	Modo3	Modo4	Modo5	Modo6
h_{agua} (cm)	Vol (lts)	t_{general} (s)	t_{registro} (s)	Frecuencias (Hz)					
60,3	154,9	109	10	12,78	13,9	21,4	24,09	27,02	30,35
55,9	144,4	139	40	13,32	14,69	21,86	25,03	27,85	31,74
50,3	128,6	186	87	14,16	15,46	23,51	-	29,67	-
46,0	118,5	217	118	14,92	16,88	-	-	-	-
40,5	103	268	169	16,25	17,83	-	-	-	-
33,8	86,4	327	228	16,68	19,03	-	-	-	-
31,5	79,45	353	254	17,21	19,22	-	-	-	-
23,0	57,75	440	341	17,73	19,61	-	-	-	-
20,2	49,5	476	377	17,81	19,76	-	-	-	-
8,7	17,9	663	455	18,28	19,86	-	-	-	-

Tabla 9.80. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b13vaciado694.

Parámetros				Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
h_{agua} (cm)	Vol (lts)	t_{general} (s)	t_{registro} (s)	Frecuencias (Hz)					
69,4	183	27	10	11,34	12,63	20,57	22,92	24,22	30,37
68,3	177	33	16	11,42	12,69	20,64	22,90	24,35	30,42
62,3	161	92	75	12,45	13,55	20,98	23,65	-	31,73
60,1	154,7	109	92	12,79	13,85	21,22	23,79	-	32,20
55,9	144,4	139	122	13,36	14,42	22,00	-	-	32,91
50,3	128,6	186	169	14,21	15,58	-	-	-	-
46,0	118,5	217	200	14,76	16,55	-	-	-	-
40,5	103	268	251	15,61	17,60	-	-	-	-
33,8	86,4	327	310	16,40	18,60	-	-	-	-
31,5	79,45	353	336	16,69	19,30	-	-	-	-
23,0	57,75	440	423	17,42	19,27	-	-	-	-
20,2	49,5	476	459	17,54	19,93	-	-	-	-
15,0	38,05	577	560	17,89	19,97	-	-	-	-

Tabla 9.81. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b14vaciado601.

Parámetros				Modo1	Modo2	Modo3	Modo4	Modo5	Modo6
h_{agua} (cm)	Vol (Its)	t_{general} (s)	t_{registro} (s)	Frecuencias (Hz)					
60,1	154,7	109	10	13,26	14,96	22,66	23,94	27,02	29,70
55,9	144,4	139	40	14,03	15,96	23,45	25,03	27,85	30,95
50,3	128,6	186	87	15,18	17,55	23,59	-	29,67	32,89
46,0	118,5	217	118	15,71	18,25	-	-	-	-
40,5	103	268	169	16,32	18,87	-	-	-	-
33,8	86,4	327	228	16,98	19,51	-	-	-	-
31,5	79,45	353	254	17,21	19,74	-	-	-	-
23,0	57,75	440	341	17,66	19,55	-	-	-	-
20,2	49,5	476	377	17,81	19,47	-	-	-	-
13,7	33,75	554	455	18,02	19,75	-	-	-	-
9	18,45	663	564	18,05	19,82	-	-	-	-

Tabla 9.82. Identificación de frecuencias para determinadas alturas, registro b15vaciado672.

Parámetros				Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Mod o 5	Mod o 6
h_{agua} (cm)	Vol (Its)	t_{general} (s)	t_{registro} (s)	Frecuencias (Hz)					
67,2	171,05	39	10	13,26	14,96	20,45	21,91	23,95	29,70
62,3	161	92	40	14,03	15,96	20,94	23,01	24,25	30,95
60,1	154,7	109	87	15,18	17,55	20,98	23,40	25,80	32,89
55,9	144,4	139	118	15,71	18,25	21,04	23,86	26,92	-
50,3	128,6	186	169	16,32	18,87	22,06	24,99	27,77	-
46	118,5	217	228	16,98	19,51	22,71	-	29,60	-
40,5	103	268	254	17,21	19,74	-	-	-	-
33,8	86,4	327	341	17,66	19,55	-	-	-	-
31,5	79,45	353	377	17,81	19,47	-	-	-	-

9.5.3. Métodos de identificación tiempo-frecuencia: Espectrograma y Función de Transferencia por pequeñas ventanas (tfTF)

9.5.3.1. Nivel de altura de agua variable

9.5.3.1.1. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo

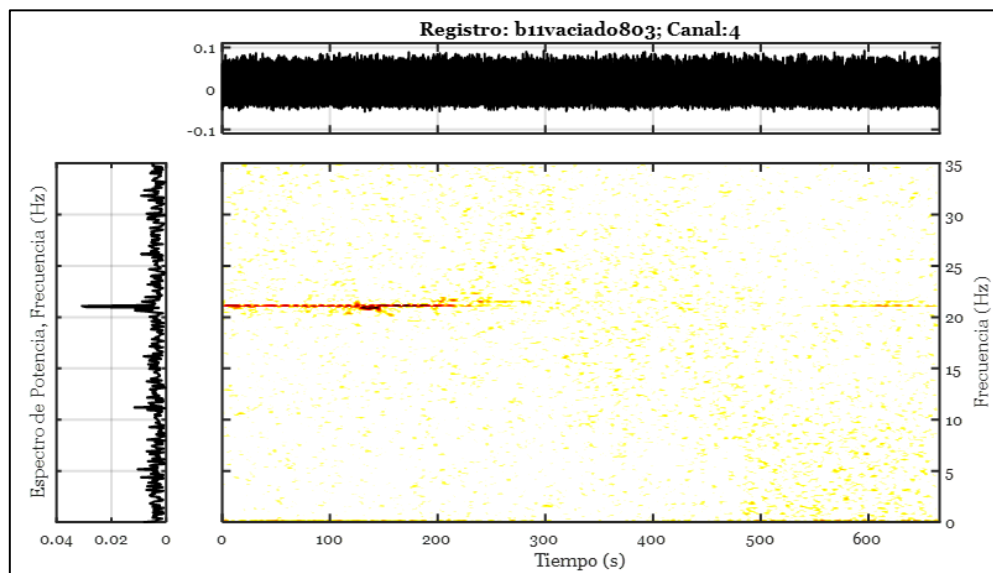


Figura 9.60. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A4, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

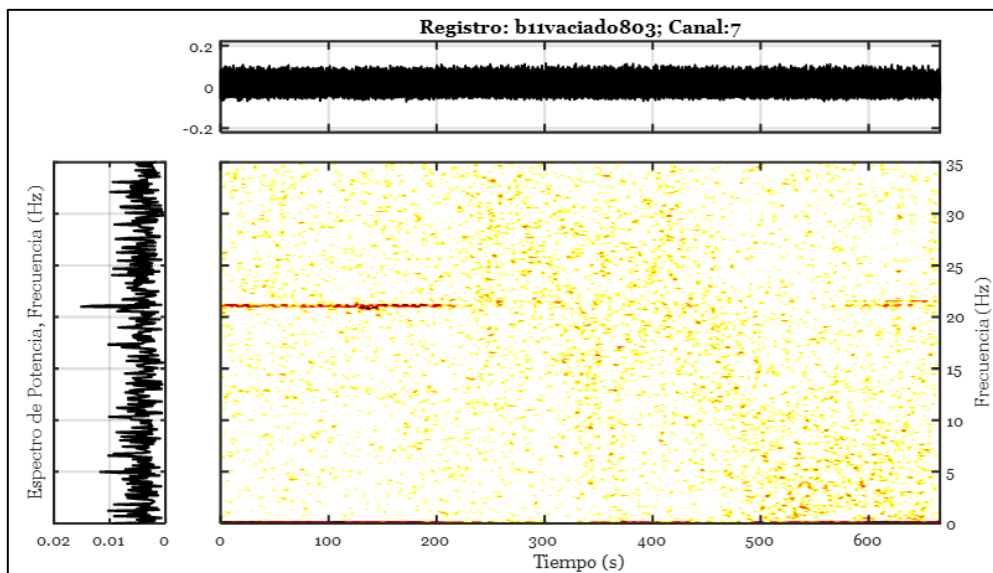


Figura 9.61. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A7, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 80,3 \text{ cm}$, sin sismo, registro b11vaciado803.

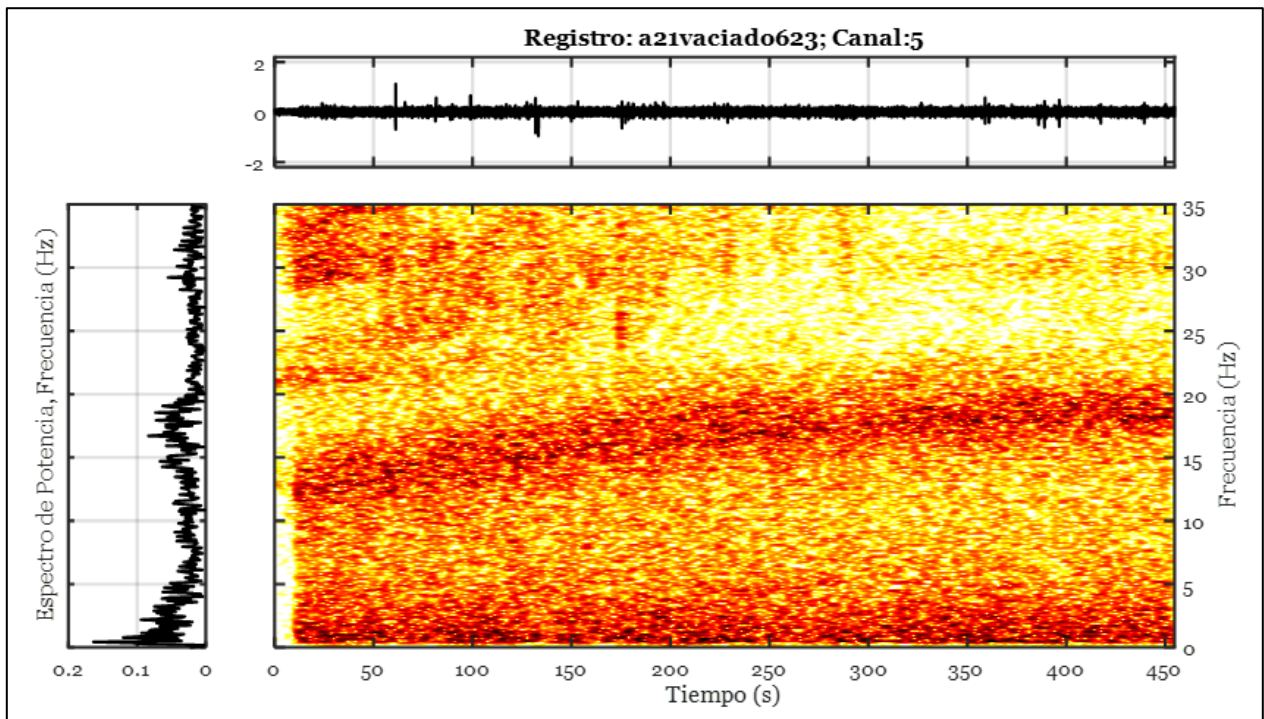
9.5.3.1.2. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691

Figura 9.62. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A5, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

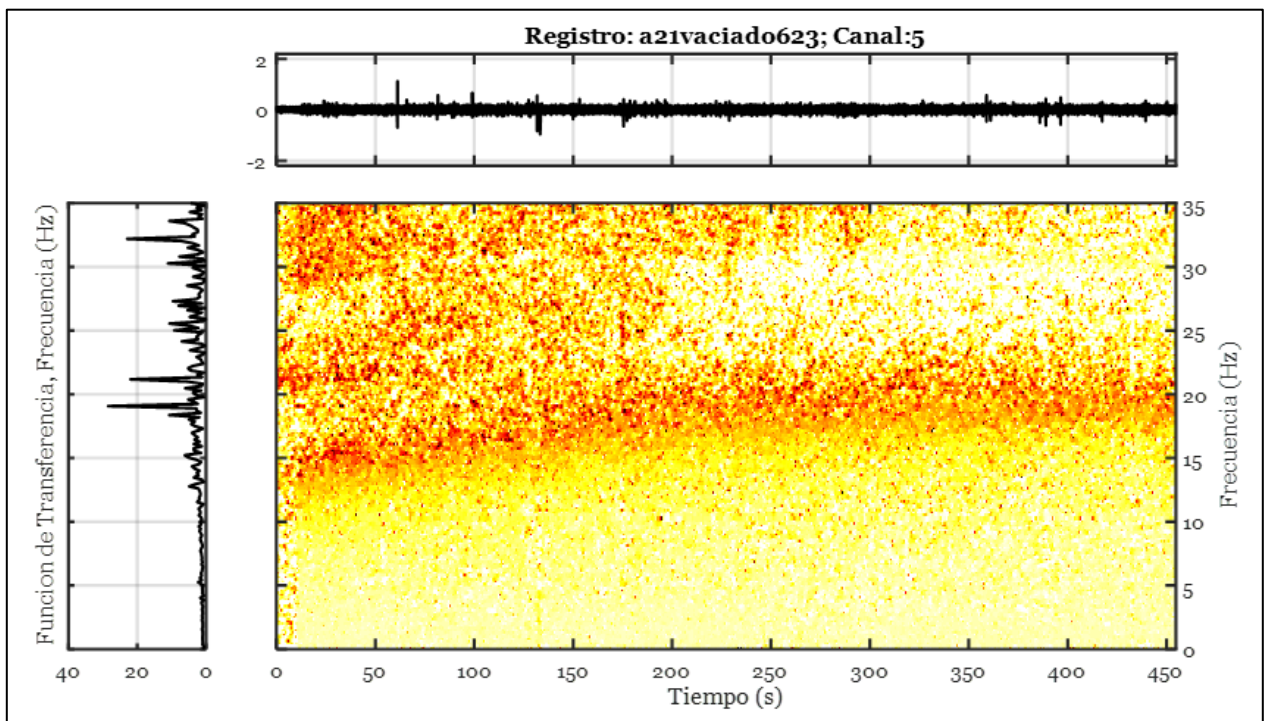


Figura 9.63. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje X, output A5 e input A6, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

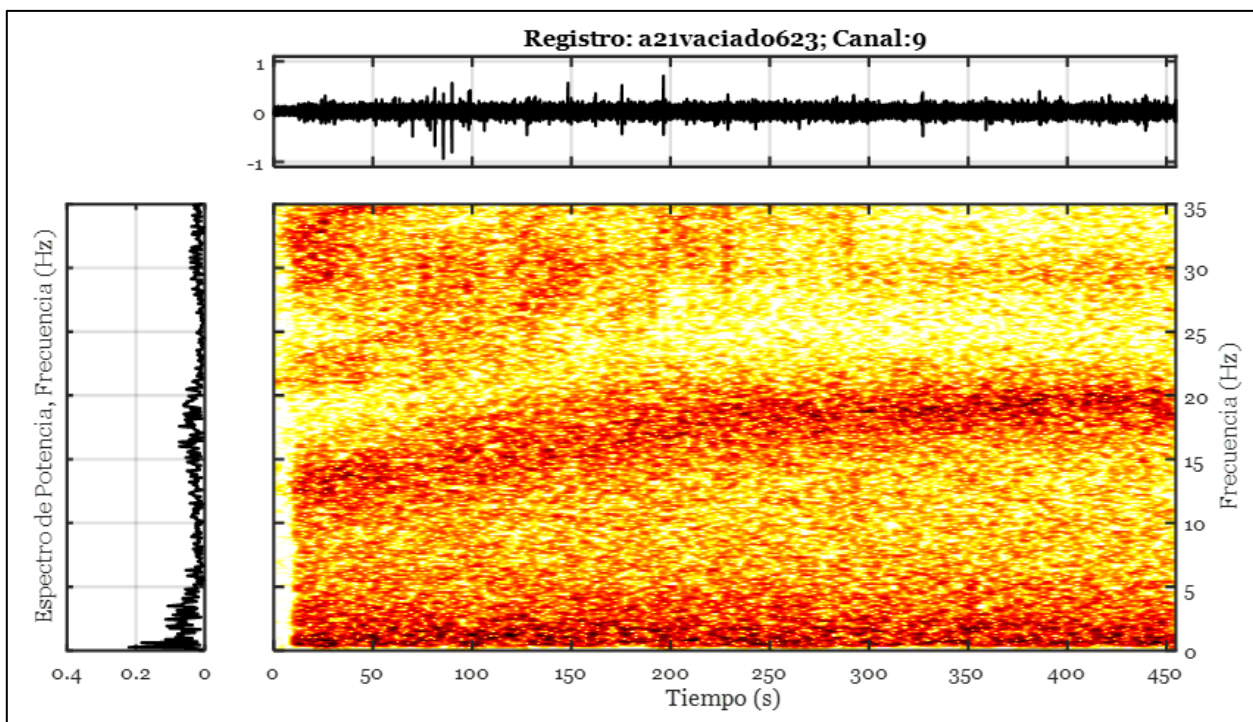


Figura 9.64. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A9, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

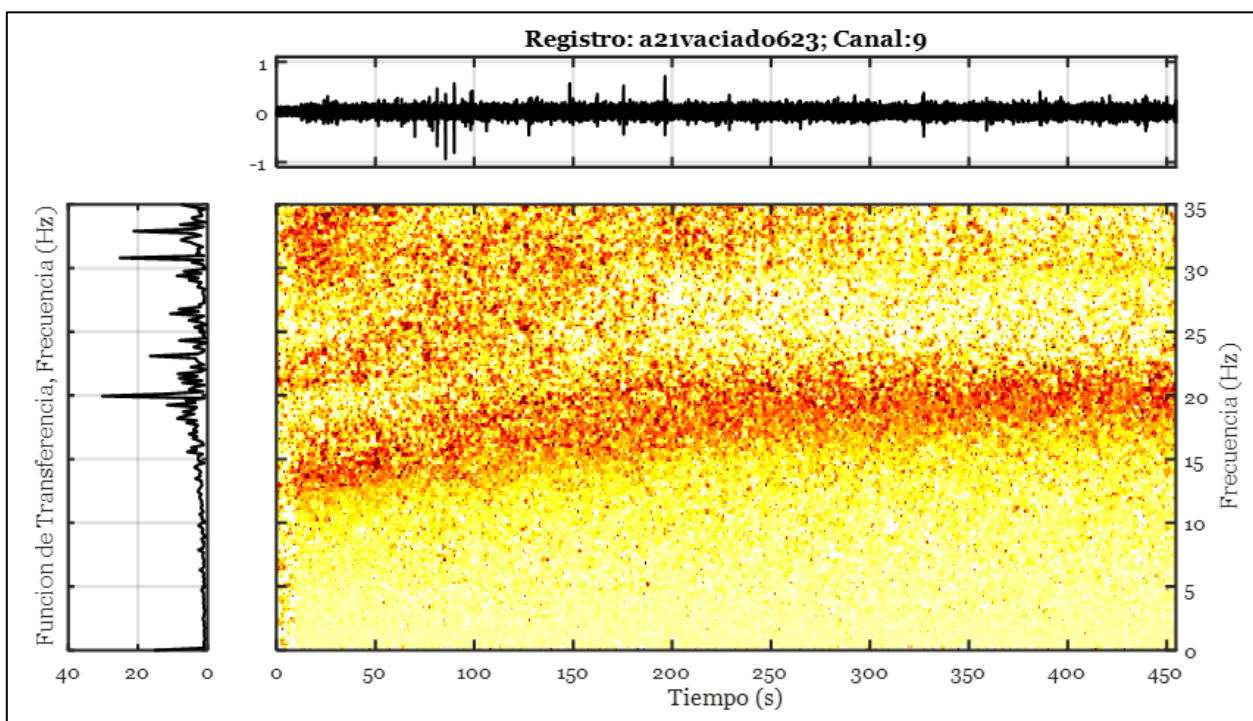


Figura 9.65. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje Y, output A9 e input A3, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 62,3 \text{ cm}$, sismo AF691, registro a21vaciado623.

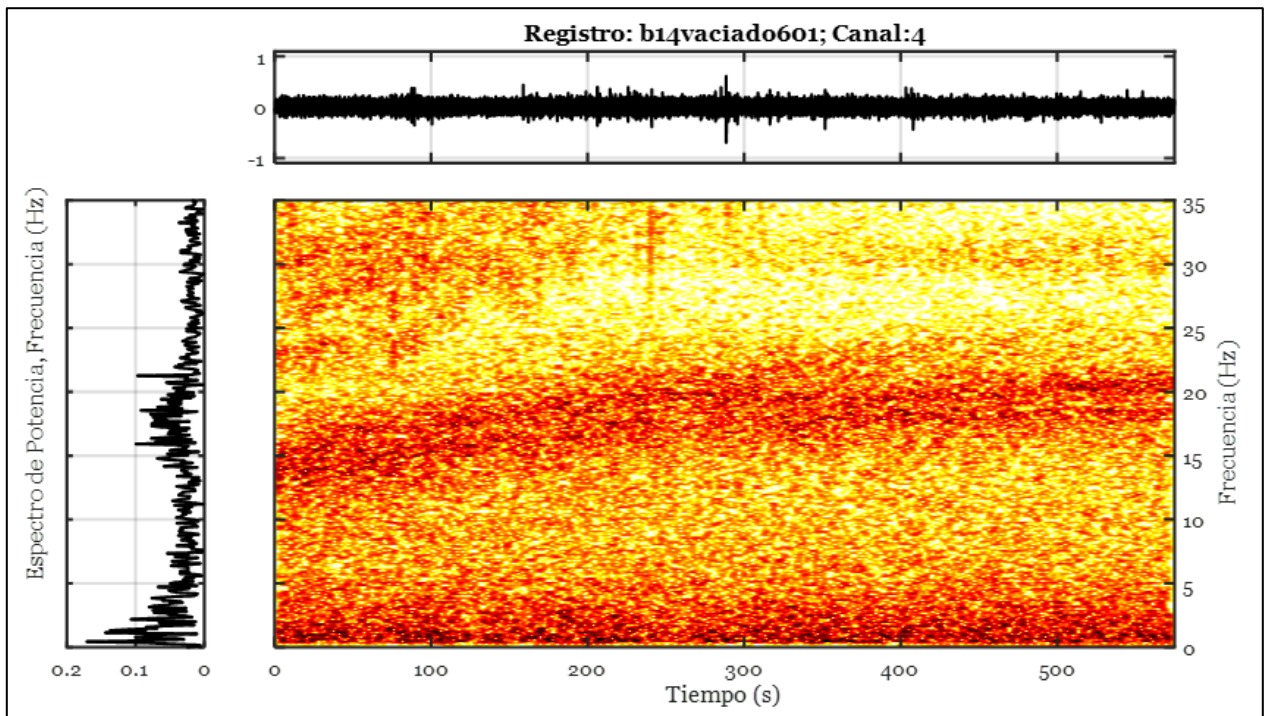
9.5.3.1.3. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693

Figura 9.66. Espectrograma, análisis en la dirección eje X, output A4, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

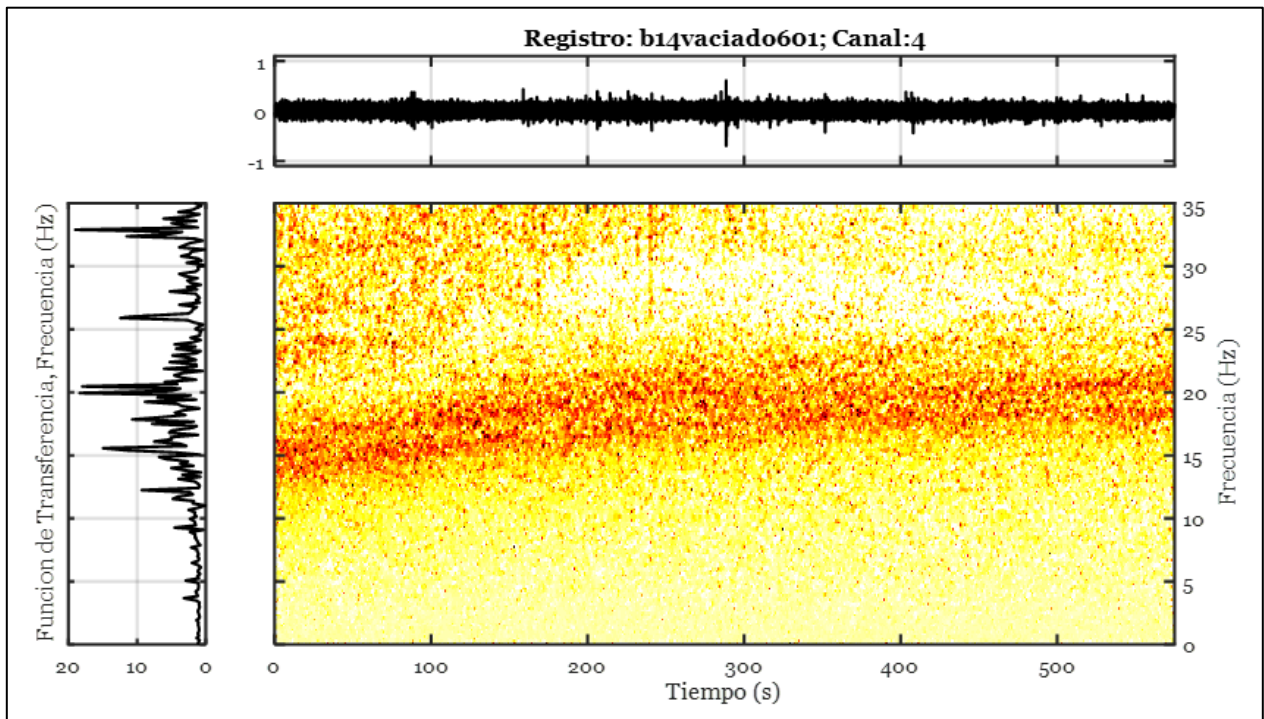


Figura 9.67. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje X, output A4 e input A12, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 60,1 \text{ cm}$, sismo AF693, registro b14vaciado601.

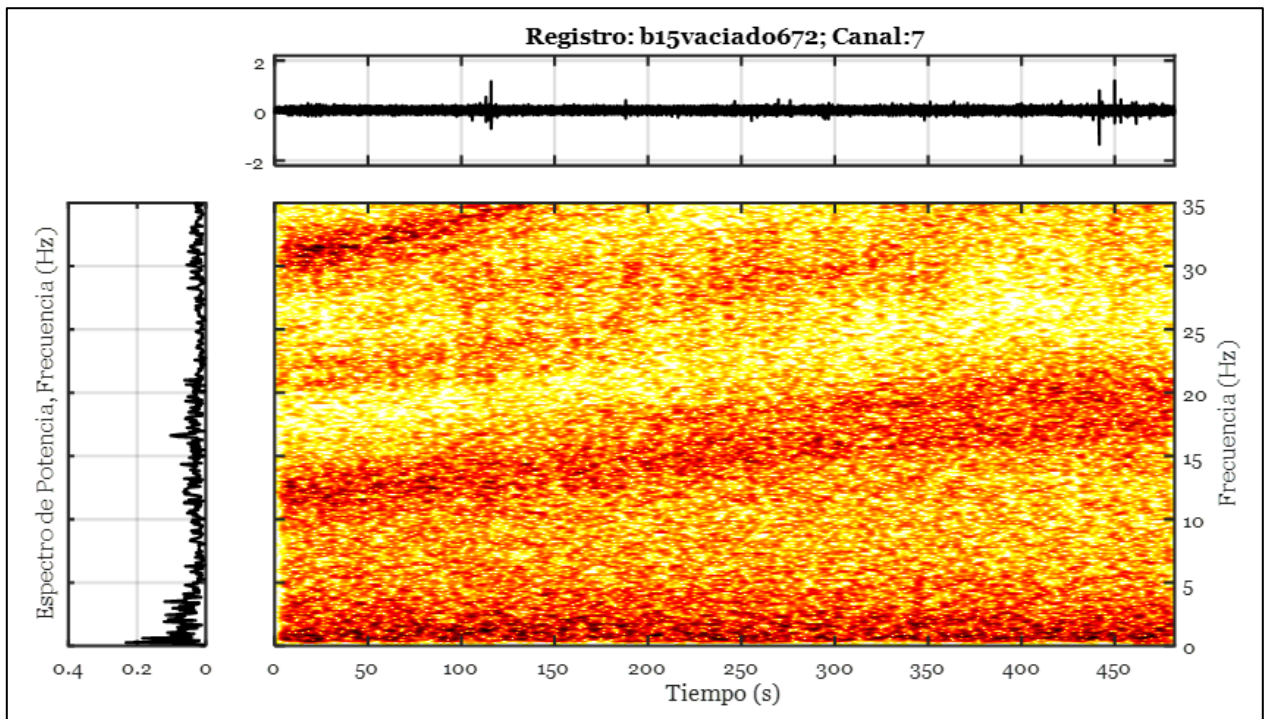
9.5.3.1.4. Vaciado de estanque desde altura de agua $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695

Figura 9.68. Espectrograma, análisis en la dirección eje Y, output A7, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

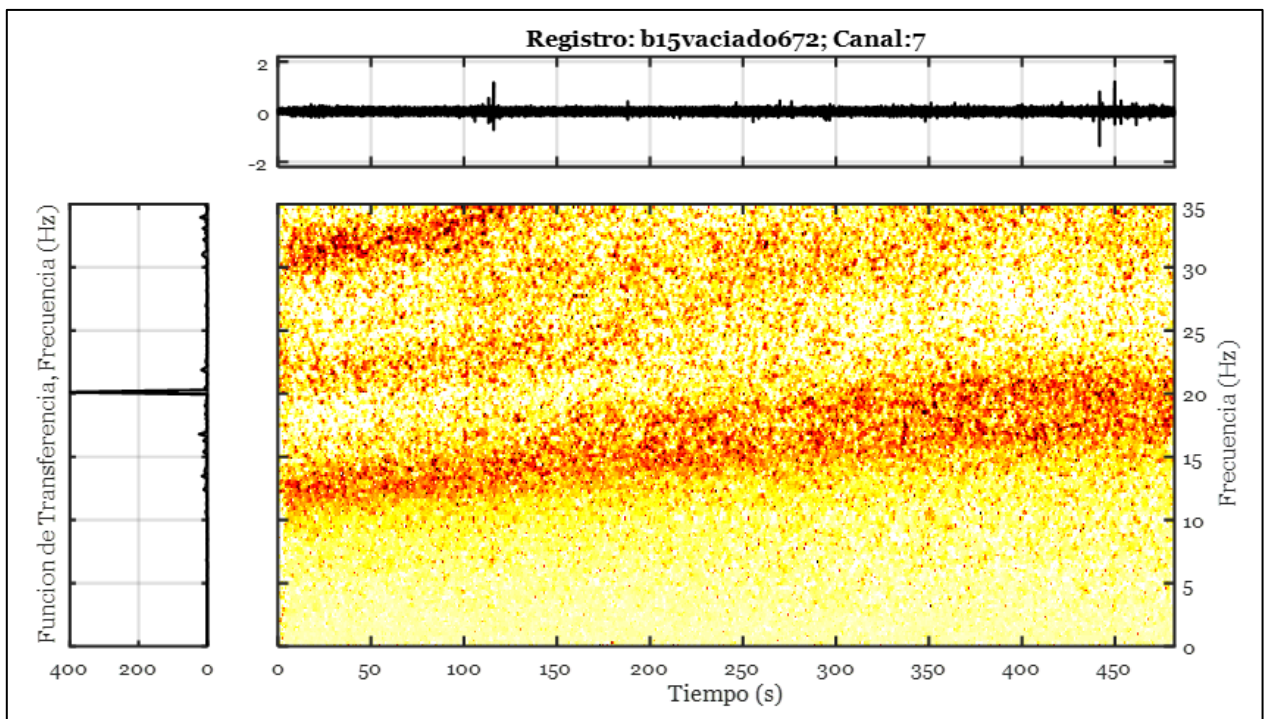


Figura 9.69. Función de Transferencia por pequeñas ventanas, análisis en la dirección eje Y, output A7 e input A11, vaciado de estanque desde $h_{inicial} = 67,2 \text{ cm}$, sismo AF695, registro b15vaciado672.

9.5.4. Comparación resultados de los métodos de identificación de propiedades dinámicas

Las siguientes tablas comparativas, se utilizan para presentar los gráficos de la sección 6.5.

Tabla 9.83. Identificación de frecuencias naturales del Modo 1.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	ITD	DSI	SMFDD
			Frecuencias (Hz)		
73,10	186,05	201,48	10,42	10,53	10,75
68,30	177,00	192,42	11,20	11,42	11,24
62,30	161,00	176,43	11,94	12,45	12,38
60,10	154,00	170,12	12,63	12,79	12,67
55,90	144,40	159,83	13,84	13,34	13,43
50,30	128,60	144,02	14,12	14,19	14,38
46,00	118,50	133,93	15,69	14,84	15,51
40,50	103,00	118,42	16,13	15,93	16,12
33,80	86,40	101,83	16,63	16,54	17,00
31,50	79,45	94,87	16,60	16,95	17,28
23,00	57,75	73,18	17,37	17,58	17,79
20,20	49,50	64,92	18,15	17,68	18,23
13,70	33,75	49,18	18,01	18,15	18,33

Tabla 9.84. Identificación de frecuencias naturales del Modo 2.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	ITD	DSI	SMFDD
			Frecuencias (Hz)		
73,10	186,05	201,48	11,30	11,40	11,46
68,30	177,00	192,42	12,01	12,09	12,43
62,30	161,00	176,43	12,61	12,69	12,71
60,10	154,00	170,12	13,08	13,55	13,56
55,90	144,40	159,83	14,01	13,88	14,10
50,30	128,60	144,02	14,72	14,56	15,46
46,00	118,50	133,93	16,36	15,52	16,48
40,50	103,00	118,42	16,46	16,72	17,21
33,80	86,40	101,83	17,00	17,72	18,12
31,50	79,45	94,87	16,65	18,82	18,15
23,00	57,75	73,18	17,72	19,26	18,89
20,20	49,50	64,92	18,84	19,44	19,15
13,70	33,75	49,18	18,70	19,85	19,42

Tabla 9.85. Identificación de frecuencias naturales del Modo 3.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	ITD	DSI	SMFDD
			Frecuencias (Hz)		
73,10	186,05	201,48	20,37	20,35	20,37
68,30	177,00	192,42	20,52	20,64	20,56
62,30	161,00	176,43	20,83	20,98	21,39
60,10	154,00	170,12	21,27	21,20	21,34
55,90	144,40	159,83	22,08	21,93	22,41
50,30	128,60	144,02	24,11	23,55	23,23
46,00	118,50	133,93	25,99	N.I.	25,08

Tabla 9.86. Identificación de frecuencias naturales del Modo 4.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	ITD	DSI
			Frecuencias (Hz)	
73,10	186,05	201,48	23,40	21,94
68,30	177,00	192,42	23,39	22,90
62,30	161,00	176,43	23,33	23,65
60,10	154,00	170,12	23,66	23,94
55,90	144,40	159,83	24,08	25,03
50,30	128,60	144,02	24,59	N.I.
46,00	118,50	133,93	25,24	N.I.
40,50	103,00	118,42	27,20	N.I.

Tabla 9.87. Identificación de frecuencias naturales del Modo 5.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	ITD	DSI
			Frecuencias (Hz)	
73,10	186,05	201,48	25,78	24,00
68,30	177,00	192,42	26,00	24,35
62,30	161,00	176,43	26,18	25,69
60,10	154,00	170,12	26,39	27,02
55,90	144,40	159,83	27,18	27,85
50,30	128,60	144,02	28,12	29,67
46,00	118,50	133,93	29,57	N.I.
40,50	103,00	118,42	31,47	N.I.

Tabla 9.88. Identificación de frecuencias naturales del Modo 6.

h_{agua} (cm)	V_{agua} (lts)	M_{Total} (kg)	ITD	DSI	SMFDD
			Frecuencias (Hz)		
73,10	186,05	201,48	28,34	29,61	28,29
68,30	177,00	192,42	29,35	30,42	29,77
62,30	161,00	176,43	29,96	31,73	30,26
60,10	154,00	170,12	30,74	31,28	30,40
55,90	144,40	159,83	30,76	32,33	31,74
50,30	128,60	144,02	31,91	35,19	32,67
46,00	118,50	133,93	32,64	N.I.	35,35
40,50	103,00	118,42	34,55	N.I.	N.I.

Notar que las Tabla 9.86 y Tabla 9.87 no contienen los resultados del método SMFDD debido a que no se logran identificar al aplicar dicho método.