



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

VIBRACIONES PRODUCIDAS POR COMPUERTAS PARCIALMENTE ABIERTAS EN UN
TÚNEL DE UNA PRESA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CARLOS ALFREDO MAQUEDA RAMÍREZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., NOVIEMBRE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

Secretario: M.I. Franco Víctor

1^{er}. Vocal: Dr. Pozos Estrada Óscar

2^{do}. Vocal: Dr. Pozos Estrada Adrián

3^{er}. Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Óscar Pozos Estrada

FIRMA

Dedicatorias

A mi mamá, eres la persona más valiente que conozco.

A mi hermana Mary, por tus enseñanzas, críticas y sabios consejos.

A mi papá Prisciliano, por todo lo que he aprendido de ti.

A mis primas Mis Bri, Lauri, Nene y mi tía Adela, siempre han estado conmigo.

Agradecimientos

Al Dr. Óscar Pozos Estrada, quién me brindó su apoyo para realizar mi tesis, por su cortesía, amabilidad, sus consejos, recomendaciones, pero sobre todo por el apoyo en el laboratorio.

Al Dr. Adrián Pozos Estrada por su apoyo tanto en el laboratorio como en el manejo de la información aquí presentada, por su amable atención.

Al Mtro. Rigoberto Nava, por sus conocimientos, recomendaciones y su atención, las cuales fueron parte fundamental para mi tesis.

A mi amigo Javier Angulo, gracias por tu apoyo, tu amistad y por tus buenos consejos.

A mis amigos y compañeros de maestría, en especial a Armando, Diana y Efraín, por su apoyo y su valiosa amistad durante mis estudios de maestría.

A mis profesores, de quienes me llevo, conocimientos, consejos y recomendaciones profesionales, las cuales considero de mucho valor.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que fue, y espero que en un futuro también, parte fundamental en esta meta que me había propuesto.

RESUMEN

Las presas son obras de infraestructura fabricadas en roca, concreto o materiales sueltos, que se construyen al paso de un río o arroyo. Este tipo de obra está diseñada principalmente para prevenir inundaciones, generar energía eléctrica, almacenar el vital líquido para consumo humano, sector agrícola, cultivo de peces y sector industrial.

Las presas están constituidas por una serie de elementos para operarlas y manejarlas de la manera más adecuada posible. La obra de desfogue de fondo es uno de ellos y consta de estructuras tipo túnel de tipo túnel o de conductos cerrados, generalmente revestidos. La función del revestimiento son: resistir las cargas exteriores de roca y la presión interna del agua, proteger a la roca contra la acción del agua, reducir y evitar las filtraciones. Estos túneles se instalan en el fondo de una presa y atraviesan la cortina de aguas arriba hacia aguas abajo. Este tipo de obra tiene la función principal de regular el nivel de agua en una presa, para condiciones normales y de emergencia en un momento dado. El desfogue es controlado mediante compuertas que regulan el gasto.

En el momento en que el desfogue necesite entrar en operación, las compuertas comienzan a abrirse, provocando velocidades y vibraciones altas, principalmente aguas abajo de la compuerta, además de la generación de presiones menores a la atmosférica o sub-presiones, que pueden provocar la presencia de cavitación, la cual erosiona y debilita las paredes de un túnel, quedando así una estructura vulnerable a las fuerzas producidas por el agua.

La presente tesis tiene como objetivo principal determinar los desplazamientos, mediante el comportamiento de las vibraciones, que se puedan presentar en un desfogue de fondo controlado por una compuerta reguladora de tipo circular, bajo diferentes condiciones hidráulicas, tanto aguas arriba como aguas abajo de ésta, y cómo estas situaciones hidráulicas pueden afectar los túneles de desfogue de fondo.

ABSTRACT

Dams are civil infrastructure works built with rock, concrete or loose materials, and they are built on rivers or streams. This type of infrastructure is mainly designed to prevent flooding, to generate electric power, to store water for human consumption, agricultural, fishing and industrial sector.

Dams are made up of several items to manage and operate them in the best possible way. Bottom discharge tunnel is one of them and consist of a tunnel or close conduit, generally lined. The function of the lined is: to resist the external loads caused by the rock, internal pressure caused by water, to protect the rock against the action of water, to reduce and avoid leaks. These tunnels are installed at the bottom of a dam, and go through the body from upstream to downstream. This element has the main function to regulate water level in a dam, under normal or emergency conditions, depending on the case. Bottom discharge is controlled by gates that regulate the flow.

When the bottom discharge starts operating, the gates begin to open, causing high speed and vibrations, mainly downstream of the gate. This situation generate presence of pressures lower than atmospheric or sub-pressures, which can cause the presence of cavitation, and this in turn can erode and weakens the walls of a tunnel, thus leaving a structure vulnerable to the forces produced by water.

The main objective of this thesis is to determinate the displacements, through the behavior of vibrations, that may occur in a bottom tunnel controlled by a circular-type regulating gate, under different hydraulic conditions, both upstream and downstream of it, and how these hydraulic situations can affect outlet works.

CONTENIDO

1	Desfogues de fondo de presas	1
1.1	Definición	1
1.2	Ubicación de los desfogues de fondo	2
1.3	Elementos que conforman a los desfogues de fondo	4
1.3.1	Conducto.....	4
1.3.2	Estructura de entrada	4
1.3.3	Dispositivos de control	5
1.3.4	Elementos de descarga.....	6
1.4	Funciones de los desfogues de fondo	7
1.5	Consideraciones técnicas de diseño	7
2	Problemas y daños en desfogues de fondo de presas	8
2.1	Problemas y daños en desfogues de fondo de concreto.....	8
2.1.1	Agrietamiento	8
2.1.2	Defectos de superficie	9
2.1.3	Erosión por abrasión.....	9
2.1.4	Erosión por cavitación	10
2.2	Problemas y daños en desfogues de fondo de metal.....	13
2.2.1	Deformación	13
2.2.2	Corrosión	13
2.2.3	Fatiga	14
2.3	Accidentes en desfogues de fondo de presas	14
2.3.1	Presa Hoover (antes presa Boulder)	14
2.3.2	Presa Yellowtail.....	15
2.3.3	Presa Glen Canyon	16
2.4	Prevención y corrección de daños en desfogues de fondo.....	17
2.4.1	Problemas superficiales	18
2.4.2	Problemas estructurales	18
3	Aireación en desfogues de fondo	19
3.1	Generalidades.....	19
3.2	Tipos de flujo y mecanismos de la aireación.....	20
3.3	Demanda y suministro de aire.....	22

3.4	Dimensionamiento del aireador	24
3.4.1	Flujo de aire y agua	24
3.4.2	Coefficiente de flujo en el aireador.....	25
3.4.3	Pérdidas en el aireador.....	25
3.4.4	Aireadores con sección transversal rectangular.....	27
4	Vibración y desplazamiento	28
4.1	Estudio en obras hidráulicas / estado del arte	28
4.2	Vibración	31
4.3	Representación de la vibración	31
4.3.1	Vibración simple	31
4.3.2	Vibración compuesta	32
4.3.3	Vibración aleatoria	33
4.4	Análisis espectral	34
4.4.1	Métodos de análisis espectral	35
4.4.2	Transformada Discreta de Fourier	36
4.4.3	Método de Welch.....	40
4.5	Ruido y filtro en señales digitales.....	42
4.5.1	Ruido en señales digitales	42
4.5.2	Filtro en señales digitales	43
4.6	Prueba de vibración libre	44
4.7	Transductores de vibración.....	46
4.8	Desplazamiento.....	47
4.8.1	Determinación de desplazamientos	47
4.8.2	Método de la diferencia central	48
5	Desarrollo de la investigación	52
5.1	Dispositivo experimental	52
5.2	Dispositivos de medición.....	53
5.2.1	Compuertas.....	53
5.2.2	Medición de gasto.....	54
5.2.3	Medición de velocidad en el dispositivo aireador (venteo).....	55
5.2.4	Medición de presión en el dispositivo aireador (venteo).....	55
5.2.5	Acelerómetros o sensores	55

5.3	Prueba de vibración libre en el dispositivo	57
5.3.1	Fijación de la tubería	57
5.3.2	Calibración de los sensores.....	58
5.3.3	Obtención de parámetros estructurales de la tubería	59
5.4	Medición de vibración	61
5.4.1	Ubicación de los acelerómetros	61
5.4.2	Sujeción de los acelerómetros	63
5.5	Condiciones hidráulicas	63
5.6	Análisis de las vibraciones.....	65
5.6.1	Ajuste inicial de las vibraciones	65
5.6.2	Filtrado de las vibraciones.....	66
5.6.3	Análisis espectral.....	67
5.6.4	Cálculo de los desplazamientos.....	68
6	Resultados.....	71
6.1	A superficie libre sin salto hidráulico (SSH).....	71
6.1.1	Compuerta del 10% de apertura	71
6.1.2	Compuerta del 20% de apertura	76
6.1.3	Compuerta del 30% de apertura	78
6.1.4	Compuerta del 40% de apertura	80
6.2	Escenarios con salto hidráulico (CSH)	82
6.2.1	Compuerta del 10% de apertura	82
6.2.2	Compuerta del 20% de apertura	85
6.2.3	Compuerta del 30% de apertura	87
6.2.4	Compuerta del 40% de apertura	89
6.2.5	Compuerta del 50% de apertura	91
6.2.6	Compuerta del 60% de apertura	93
6.3	Escenarios sin dispositivo aireador o venteo (SV)	95
6.3.1	Compuerta del 10% de apertura	95
6.3.2	Compuerta del 20% de apertura	97
6.3.3	Compuerta del 30% de apertura	99
6.3.4	Compuerta del 40% de apertura	101
6.3.5	Compuerta del 50% de apertura	102

6.3.6	Compuerta del 60% de apertura	104
6.4	Análisis de resultados	106
6.4.1	Condición hidráulica: SSH, CSH y SV	106
6.4.2	Comparación de los desplazamientos en el conducto con salto hidráulico..	110
7	Conclusiones y recomendaciones	114
Anexos		116
Anexo A.1. Frecuencia natural de la tubería de estudio		116
Anexo A.2. Período de vibración y fracción de amortiguamiento		119
Anexo A.3. Código de MATLAB		121
Anexo A.4. Densidad espectral de potencia DEP		124
Flujo a superficie libre (SSH).....		124
Flujo con salto hidráulico (CSH).....		130
Sin dispositivo aireador o venteo (SV).....		139
Anexo A.5. Desplazamiento promedio.....		148
Flujo a superficie libre (SSH).....		148
Flujo con salto hidráulico (CSH).....		152
Sin dispositivo aireador o venteo (SV).....		158
Bibliografía.....		164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Desfogue de fondo-presa Karún-3, Irán, 2017.....	2
Figura 1.2. Esquema de desfogue intermedio y de fondo en presa de concreto.....	3
Figura 1.3. Esquema de desfogue de fondo en una presa de materiales sueltos	3
Figura 1.4. Estructura de entrada a través de una cortina de concreto (Torres Herrera, 1987)	4
Figura 1.5. Estructura de entrada con torre y túnel a presión en presa de materiales sueltos (Torres Herrera, 1987).....	5
Figura 1.6. Estructura de entrada con tiro vertical, túnel a presión, galería vertical para compuertas deslizantes y conducto abierto, en presa de materiales sueltos (Torres Herrera, 1987).....	5
Figura 1.7. Estructura de entrada con tiro vertical, reducción con válvula de mariposa y salida con válvula de chorro divergente, en presa de materiales sueltos (Torres Herrera, 1987).....	5
Figura 1.8. Esquema general de un desfogue de presa (modificado de Vischer and Hager, 1998).....	6
Figura 2.1. Proceso de la abrasión y movimientos típicos de los sedimentos (modificado de Müller-Hagmann, 2017)	10
Figura 2.2. Curva característica de la presión de vapor del agua	11
Figura 2.3. Esquema del comportamiento de los tipos de energía en un punto de regulación (Marchegiani, 2006)	12
Figura 2.4. Proceso del fenómeno de cavitación en el centro (figura superior) y pared de la tubería (figura inferior).....	12
Figura 2.5. Daños provocados por cavitación en el túnel de la presa Hoover (Warren., 2012)	15
Figura 2.6. Daños por cavitación, túnel de la presa Yellowtail (Arndt, 2003).....	16
Figura 2.7. Daños por cavitación en túnel izquierdo, Presa Glen Canyon (Falvey, 1990) ..	17
Figura 2.8. Daños por cavitación en túnel derecho, presa Glen Canyon (Falvey, 1990)	17
Figura 3.1. Esquema de flujos de aire habituales en desfogues de fondo (CNEGP, 1997)..	20
Figura 3.2. Tipos de flujos en desfogues de fondo. a) Flujo de aire. b) Flujo pulverizado. c) Flujo supercrítico en lámina libre. d) Flujo emulsionado. e) Salto hidráulico. f) Salto Hidráulico en carga. g) Salto hidráulico sumergido (modificado de Pozo et al., 2014).....	21
Figura 3.3. Geometría y transiciones en un túnel de desfogue (Levin, 1965).....	23
Figura 3.4. Esquema de ángulo en codo.....	26
Figura 3.5. Esquema de ángulo y radio en codo con cambio de dirección suavizado	26
Figura 4.1. Desplazamiento perpendicular en micrómetros del muro guía, presa Xiangjiba, China (Wang et al. 2007).....	28
Figura 4.2. Vibración (aceleración) en función de la presión para 6 tipos diferentes de tubería (modificado de Thompson, 2009)	29
Figura 4.3. Respuesta natural de la tubería vacía (Seguel, 2014).....	30
Figura 4.4. Desplazamiento horizontal (a) y vertical (b) en micrómetros, muro guía, presa de las Tres Gargantas, China (Lian et al. 2019)	30
Figura 4.5. Señal de vibración simple o senoidal y sus componentes.....	32

Figura 4.6. Señal de vibración compuesta.....	33
Figura 4.7. Señal de vibración aleatoria o estacionaria-aleatoria (modificado de A-MAQ S.A., 2005).....	34
Figura 4.8. Señal de vibración compuesta en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia (modificado de A-MAQ S.A., 2005)	35
Figura 4.9. Señal digital original-azul comparada con la misma señal filtrada-roja (modificado de Gómez, 2017).....	43
Figura 4.10. Esquema del funcionamiento básico y general de cada filtro (modificado de Quiroz, 2007).....	44
Figura 4.11. Registro de vibración libre de un modelo de plexiglás (Chopra, 2014).....	45
Figura 4.12. Esquema general de un acelerómetro piezoeléctrico (modificado de White G., 2010).....	47
Figura 5.1. Esquema general del dispositivo experimental, Instituto de Ingeniería, UNAM	53
Figura 5.2. Variador de velocidad de la bomba.....	53
Figura 5.3. Esquema de compuertas circulares parcialmente abiertas	54
Figura 5.4. Medidor de flujo ultrasónico PrimeFlo-T	54
Figura 5.5. Anemómetro testo 435	55
Figura 5.6. Sensores inalámbricos y base receptora.....	56
Figura 5.7. Interfaz del programa de adquisición de datos NodeCommander	57
Figura 5.8. Sujeción del conducto de PVC transparente a la plataforma de apoyo con cintas de tensión.....	57
Figura 5.9. Esquema de la posición de las cintas de tensión y la ubicación de los 6 golpes	58
Figura 5.10. Densidad Espectral de Potencia, golpe 1	59
Figura 5.11. Gráfica de la señal de repuesta del golpe 4, sensor 407, canal 1-X	59
Figura 5.12. Zona de estudio en el dispositivo experimental	62
Figura 5.13. Ubicación de los sensores-puntos de medición en el dispositivo	62
Figura 5.14. Elemento de sujeción para los acelerómetros	63
Figura 5.15. Compuerta del 10% de apertura reforzada con placas de acero y dañada en los costados	65
Figura 5.16. Ajuste inicial, señal original (verde) y señal ajustada (azul)	66
Figura 5.17. Señal de vibración previamente ajustada (azul) y señal filtrada (amarilla)	67
Figura 5.18. Señal de vibración ajustada y filtrada	67
Figura 5.19. Densidad espectral de potencia de la figura 5.18.....	68
Figura 5.20. Gráfica de desplazamiento y sus elementos de estudio	70
Figura 6.1. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 10% de apertura, SSH.....	72
Figura 6.2. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 10% de apertura, SSH	73
Figura 6.3. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04$ l/s.....	74
Figura 6.4. Desplazamientos promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04$ l/s.....	74
Figura 6.5. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04$ l/s.....	74

Figura 6.6. Desplazamientos promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, Q = 35.04 l/s.....	75
Figura 6.7. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, Q = 35.04 l/s.....	75
Figura 6.8. Desplazamientos promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, Q = 35.04 l/s.....	75
Figura 6.9. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 20% de apertura, SSH.....	76
Figura 6.10. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 20% de apertura, SSH.....	77
Figura 6.11. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, Q = 40.46 l/s.....	77
Figura 6.12. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, Q = 40.46 l/s.....	77
Figura 6.13. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, Q = 40.46 l/s.....	78
Figura 6.14. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 30% de apertura, SSH.....	78
Figura 6.15. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 30% de apertura, SSH.....	79
Figura 6.16. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, Q = 40.56 l/s.....	79
Figura 6.17. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, Q = 40.56 l/s.....	79
Figura 6.18. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, Q = 40.56 l/s.....	80
Figura 6.19. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 40% de apertura, SSH.....	81
Figura 6.20. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 40% de apertura, SSH.....	81
Figura 6.21. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, Q = 40.22 l/s.....	81
Figura 6.22. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, Q = 40.22 l/s.....	82
Figura 6.23. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, Q = 40.22 l/s.....	82
Figura 6.24. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 10% de apertura, CSH.....	83
Figura 6.25. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 10% de apertura, CSH.....	83
Figura 6.26. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, Q = 35.24 l/s.....	84
Figura 6.27. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, Q = 35.24 l/s.....	84
Figura 6.28. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, Q = 35.24 l/s.....	84
Figura 6.29. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 20% de apertura, CSH.....	85
Figura 6.30. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 20% de apertura, CSH.....	85
Figura 6.31. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, Q = 40.36 l/s.....	86

Figura 6.32. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36$ l/s	86
Figura 6.33. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36$ l/s	86
Figura 6.34. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 30% de apertura, CSH.....	87
Figura 6.35. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 30% de apertura, CSH	87
Figura 6.36. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23$ l/s	88
Figura 6.37. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23$ l/s	88
Figura 6.38. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23$ l/s	88
Figura 6.39. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 40% de apertura, CSH.....	89
Figura 6.40. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 40% de apertura, CSH	90
Figura 6.41. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26$ l/s	90
Figura 6.42. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26$ l/s	90
Figura 6.43. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26$ l/s	91
Figura 6.44. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 50% de apertura, CSH.....	92
Figura 6.45. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 50% de apertura, CSH	92
Figura 6.46. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73$ l/s	92
Figura 6.47. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73$ l/s	93
Figura 6.48. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73$ l/s	93
Figura 6.49. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 60% de apertura, CSH.....	94
Figura 6.50. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 60% de apertura, CSH	94
Figura 6.51. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70$ l/s	94
Figura 6.52. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70$ l/s	95
Figura 6.53. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70$ l/s	95
Figura 6.54. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 10% de apertura, SV..	96
Figura 6.55. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, $Q = 35.30$ l/s	96
Figura 6.56. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, $Q = 35.30$ l/s	97
Figura 6.57. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, $Q = 35.30$ l/s	97

Figura 6.58. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 20% de apertura, SV..	98
Figura 6.59. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70$ l/s	98
Figura 6.60. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70$ l/s	98
Figura 6.61. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70$ l/s	99
Figura 6.62. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 30% de apertura, SV..	99
Figura 6.63. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, $Q = 40.34$ l/s	100
Figura 6.64. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, $Q = 40.34$ l/s	100
Figura 6.65. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, $Q = 40.34$ l/s	100
Figura 6.66. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 40% de apertura, SV	101
Figura 6.67. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, $Q = 40.53$ l/s	101
Figura 6.68. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, $Q = 40.53$ l/s	102
Figura 6.69. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, $Q = 40.53$ l/s	102
Figura 6.70. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 50% de apertura, SV	103
Figura 6.71. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, $Q = 40.68$ l/s	103
Figura 6.72. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, $Q = 40.68$ l/s	103
Figura 6.73. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta 50% del apertura, SV, $Q = 40.68$ l/s	104
Figura 6.74. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 60% de apertura, SV	105
Figura 6.75. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s	105
Figura 6.76. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s	105
Figura 6.77. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s	106
Figura 6.78. Comparación del flujo de aire en el venteo (CSH vs SSH) utilizando la compuerta del 10% de apertura	106
Figura 6.79. Comparación de la presión en el venteo (CSH, SSH y SV) utilizando la compuerta del 10% de apertura	107
Figura 6.80. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 10% de apertura y el gasto máximo	108
Figura 6.81. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 20% de apertura y el gasto máximo	108

Figura 6.82. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 30% de apertura y el gasto máximo 109	
Figura 6.83. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 40% de apertura y el gasto máximo 109	
Figura 6.84. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las dos condiciones CSH y SV, con la compuerta del 50% de apertura y el gasto máximo	109
Figura 6.85. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las dos condiciones CSH y SV, con la compuerta del 60% de apertura y el gasto máximo	110
Figura 6.86. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 10% apertura, CSH, Q = 35 l/s.....	111
Figura 6.87. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 20% apertura, CSH, Q = 40 l/s.....	111
Figura 6.88. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 30% apertura, CSH, Q = 40 l/s.....	111
Figura 6.89. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 40% apertura, CSH, Q = 40 l/s.....	112
Figura 6.90. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 50% apertura, CSH, Q = 40 l/s.....	112
Figura 6.91. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 60% apertura, CSH, Q = 40 l/s.....	112

ANEXOS

Figura A.1. Densidad espectral de potencia, golpe 2	116
Figura A.2. Densidad espectral de potencia, golpe 3	116
Figura A.3. Densidad espectral de potencia, golpe 4	117
Figura A.4. Densidad espectral de potencia, golpe 5	117
Figura A.5. Densidad espectral de potencia, golpe 6	118
Figura A.6. Esquema de la zona de medición superior (imagen izquierda) y zona media (imagen derecha) del conducto.....	121
Figura A.7. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.04 l/s, SSH, parte superior	124
Figura A.8. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.04 l/s, SSH, parte media	125
Figura A.9. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.04 l/s, SSH, parte inferior	125
Figura A.10. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.46 l/s, SSH, parte superior	126
Figura A.11. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.46 l/s, SSH, parte media	126
Figura A.12. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.46 l/s, SSH, parte inferior	126

Figura A.13. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.56 l/s, SSH, parte superior	127
Figura A.14. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.56 l/s, SSH, parte media	127
Figura A.15. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.56 l/s, SSH, parte inferior	128
Figura A.16. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.22 l/s, SSH, parte superior	128
Figura A.17. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.22 l/s, SSH, parte media	129
Figura A.18. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.22 l/s, SSH, parte inferior	129
Figura A.19. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.24 l/s, CSH, parte superior	130
Figura A.20. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.24 l/s, CSH, parte media.....	130
Figura A.21. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.24 l/s, CSH, parte inferior.....	131
Figura A.22. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.36 l/s, CSH, parte superior	131
Figura A.23. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.36 l/s, CSH, parte media.....	132
Figura A.24. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.36 l/s, CSH, parte inferior.....	132
Figura A.25. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.23 l/s, CSH, parte superior	133
Figura A.26. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.23 l/s, CSH, parte media.....	133
Figura A.27. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.23 l/s, CSH, parte inferior.....	134
Figura A.28. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.26 l/s, CSH, parte superior	134
Figura A.29. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.26 l/s, CSH, parte media.....	135
Figura A.30. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.26 l/s, CSH, parte inferior.....	135
Figura A.31. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, Q = 40.73 l/s, CSH, parte superior	136
Figura A.32. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, Q = 40.73 l/s, CSH, parte media.....	136
Figura A.33. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, Q = 40.73 l/s, CSH, parte inferior.....	137

Figura A.34. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.70 l/s, CSH, parte superior	137
Figura A.35. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.70 l/s, CSH, parte media.....	138
Figura A.36. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.70 l/s, CSH, parte inferior.....	138
Figura A.37. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.30 l/s, SV, parte superior	139
Figura A.38. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.30 l/s, SV, parte media.....	139
Figura A.39. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.30 l/s, SV, parte inferior	140
Figura A.40. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.70 l/s, SV, parte superior	140
Figura A.41. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.70 l/s, SV, parte media.....	141
Figura A.42. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.70 l/s, SV, parte inferior	141
Figura A.43. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.34 l/s, SV, parte superior	142
Figura A.44. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.34 l/s, SV, parte media.....	142
Figura A.45. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.34 l/s, SV, parte inferior	143
Figura A.46. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.53 l/s, SV, parte superior	143
Figura A.47. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.53 l/s, SV, parte media.....	144
Figura A.48. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, Q = 40.53 l/s, SV, parte inferior	144
Figura A.49. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, Q = 40.68 l/s, SV, parte superior	145
Figura A.50. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, Q = 40.68 l/s, SV, parte media.....	145
Figura A.51. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, Q = 40.68 l/s, SV, parte inferior	146
Figura A.52. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.51 l/s, SV, parte superior	146
Figura A.53. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.51 l/s, SV, parte media.....	147
Figura A.54. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.51 l/s, SV, parte inferior	147

Figura A.55. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46$ l/s.....	148
Figura A.56. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46$ l/s.....	148
Figura A.57. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46$ l/s.....	149
Figura A.58. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56$ l/s.....	149
Figura A.59. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56$ l/s.....	149
Figura A.60. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56$ l/s.....	150
Figura A.61. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, $Q = 40.22$ l/s.....	150
Figura A.62. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, $Q = 40.22$ l/s.....	150
Figura A.63. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, $Q = 40.22$ l/s.....	151
Figura A.64. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24$ l/s	152
Figura A.65. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24$ l/s	152
Figura A.66. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24$ l/s	152
Figura A.67. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36$ l/s	153
Figura A.68. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36$ l/s	153
Figura A.69. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36$ l/s	153
Figura A.70. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23$ l/s	154
Figura A.71. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23$ l/s	154
Figura A.72. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23$ l/s	154
Figura A.73. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26$ l/s	155
Figura A.74. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26$ l/s	155
Figura A.75. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26$ l/s	155

Figura A.76. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73$ l/s	156
Figura A.77. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73$ l/s	156
Figura A.78. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73$ l/s	156
Figura A.79. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70$ l/s	157
Figura A.80. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70$ l/s	157
Figura A.81. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70$ l/s	157
Figura A.82. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, $Q = 35.30$ l/s	158
Figura A.83. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, $Q = 35.30$ l/s	158
Figura A.84. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, $Q = 35.30$ l/s	158
Figura A.85. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70$ l/s	159
Figura A.86. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70$ l/s	159
Figura A.87. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70$ l/s	159
Figura A.88. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, $Q = 40.34$ l/s	160
Figura A.89. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, $Q = 40.34$ l/s	160
Figura A.90. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, $Q = 40.34$ l/s	160
Figura A.91. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, $Q = 40.53$ l/s	161
Figura A.92. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, $Q = 40.53$ l/s	161
Figura A.93. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, $Q = 40.53$ l/s	161
Figura A.94. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, $Q = 40.68$ l/s	162
Figura A.95. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, $Q = 40.68$ l/s	162
Figura A.96. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, $Q = 40.68$ l/s	162

Figura A.97. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s 163

Figura A.98. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s 163

Figura A.99. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s 163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Coeficiente de pérdida local por malla o rejilla (ASHRAE, 1981).....	26
Tabla 3.2. Coeficiente de pérdida por codo (ASHRAE, 1981)	26
Tabla 3.3. Coeficiente de pérdida por codo con cambio de dirección suavizado (ASHRAE, 1981).....	26
Tabla 5.1. Especificaciones técnicas de los sensores LORD MicroStrain	56
Tabla 5.2. Cálculo del periodo de vibración y la fracción de amortiguamiento, golpe 4.....	60
Tabla 5.3. Promedio del periodo de vibración y la fracción de amortiguamiento de la tubería de estudio.....	60
Tabla 5.4. Escenarios simulados en el dispositivo	64
Tabla 6.1. Escenarios para la compuerta del 10% de apertura, SSH.....	72
Tabla 6.2. Escenarios para la compuerta del 20% de apertura, SSH.....	76
Tabla 6.3. Escenarios para la compuerta del 30% de apertura, SSH.....	78
Tabla 6.4. Escenarios para la compuerta del 40% de apertura, SSH.....	80
Tabla 6.5. Escenarios para la compuerta del 10% de apertura, CSH	83
Tabla 6.6. Escenarios para la compuerta del 20% de apertura, CSH	85
Tabla 6.7. Escenarios para la compuerta del 30% de apertura, CSH	87
Tabla 6.8. Escenarios para la compuerta del 40% de apertura, CSH	89
Tabla 6.9. Escenarios para la compuerta del 50% de apertura, CSH	91
Tabla 6.10. Escenarios para la compuerta del 60% de apertura, CSH	93
Tabla 6.11. Escenarios para la compuerta del 10% de apertura, SV	96
Tabla 6.12. Escenarios para la compuerta del 20% de apertura, SV	97
Tabla 6.13. Escenarios para la compuerta del 30% de apertura, SV	99
Tabla 6.14. Escenarios para la compuerta del 40% de apertura, SV	101
Tabla 6.15. Escenarios para la compuerta del 50% de apertura, SV	102
Tabla 6.16. Escenarios para la compuerta del 60% de apertura, SV	104

ANEXOS

Tabla A.1. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 1	119
Tabla A.2. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 2	119
Tabla A.3. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 3	119
Tabla A.4. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 5	120
Tabla A.5. Período de vibración y fracción de amortiguamiento o, golpe 6.....	120

INTRODUCCIÓN

En el pasado han ocurrido daños importantes en túneles de presas controlados por compuertas. Por ejemplo, en los Estados Unidos, la presa Roosevelt (1908) y la presa Pathfinder (1909) presentaron daños en sus desfogues de fondo, debido a la falta de aireación en dichos túneles, lo cual permitió la presencia del fenómeno de la cavitación y ésta erosionó la superficie de ambos túneles, puntualmente en la parte inferior del conducto. Otro caso muy conocido es el de la presa Glen Canyon (1983) la cual sufrió los mismos problemas que las dos anteriores. Dentro de los casos conocidos, los desfogues de fondo han colapsado principalmente por la presencia de cavitación-erosión y vibración de acuerdo a los reportes generados.

En los conductos a presión o cerrados, en este caso un túnel de desfogue de fondo de presas, inician su operación mediante la apertura de compuertas, esta maniobra se realiza de forma controlada, por lo tanto el porcentaje de apertura varía con el tiempo. Esto conlleva a pasar de un régimen subcrítico (antes de la compuerta) a un régimen supercrítico (después de la compuerta) y con ello el aumento importante en la velocidad del agua, la generación de presiones por debajo de la atmosférica, lo cual puede producir cavitación y daños a las paredes del túnel. Las condiciones a las que es sometida el agua también generan vibraciones importantes en el conducto, además bajo ciertas circunstancias, puede presentarse salto hidráulico dentro del desfogue y provocar daños aún más importantes.

Dichas vibraciones, producidas por el comportamiento del agua bajo ciertas condiciones de operación, son recibidas por la estructura que contiene dicho fluido. Esta estructura absorbe esas vibraciones y su forma de reaccionar es desplazándose físicamente. Este movimiento puede fatigar el material de los conductos y, aunado al daño por el fenómeno de la cavitación, llevarlas al colapso.

Las investigaciones que se han realizado con respecto al estudio de las vibraciones en conductos circulares se han enfocado en la magnitud de vibración-aceleración y en el análisis espectral. Por ello, es preciso conocer, mediante el estudio de las vibraciones, los desplazamientos que éstas provocan a un conducto de desfogue de fondo debido al manejo particular del agua.

OBJETIVOS Y ALCANCES

La investigación experimental de la presente tesis tiene el objetivo principal de calcular los desplazamientos que pueda sufrir un desfogue de fondo de presas, por medio del estudio de las vibraciones presentadas en dichos conductos controlados mediante compuertas reguladoras de tipo circular bajo tres condiciones hidráulicas: flujo a superficie libre, presencia de salto hidráulico y salto completamente ahogado debido a la falta de aireación aguas abajo de la compuerta, es decir, sin venteo. Las condiciones hidráulicas mencionadas estarán sujetas a diferentes porcentajes de apertura de compuerta y a diferentes gastos. Estos desplazamientos se estimaran tanto aguas arriba como aguas abajo, así como en la parte superior, media e inferior de la tubería de estudio montada en un dispositivo experimental.

Con lo anterior, se pretende determinar qué condición hidráulica tiende a desplazar más a un túnel de desfogue, qué zona del conducto se ve más afectada, y con cuál compuerta se producen los mayores desplazamientos, es decir, las condiciones más desfavorables para este tipo de estructuras hidráulicas.

Por otro lado se estimará el requerimiento de flujo de aire y las presiones presentadas aguas abajo de las compuertas y determinar si la aireación en un desfogue de fondo es un factor que afecte a los desplazamientos.

Lo anterior permitirá un panorama más amplio al momento de diseñar túneles de desfogue de fondo, uno es el diseño de venteo y evitar el daño por cavitación, el otro es conocer las partes que presentan mayor vibración, es decir, las zonas que más desplazamiento tienen de un conducto bajo ciertas circunstancias para así reforzar en puntos estratégicos este tipo de obras. Incluso puede considerarse no sólo para el diseño, sino para el mantenimiento y/o restauración de obras de desfogue afectadas en algún momento dado.

Así mismo, se espera que este trabajo promueva otras investigaciones similares, con sus respectivas variantes como son el diámetro del conducto, tipo de compuerta, dimensiones de venteo, entre otros, además de utilizar programas computacionales especializados en estructuras.

1 Desfogues de fondo de presas

1.1 Definición

Los desfuegos de fondo de presas son dispositivos o estructuras, por lo general con forma de túnel circular o en herradura, hechos de materiales como son el concreto, el acero, o combinados, que inician desde el fondo del embalse de una presa y descargan hacia aguas abajo. Este elemento puede ser parte de la cortina o estar construido de forma independiente de la misma. Las funciones principales de esta obra son: servir como dispositivo de seguridad, es decir, para descargar excesos de agua en el embalse o apoyar a la obra de excedencias o vertedores de demasías, y otra para la limpieza de depósitos o sedimentos en el embalse.

Existen dos tipos de descarga que forman parte de una presa de forma general, el vertedor y la descarga o desfogue de fondo. Como vertedero su característica más importante es la de descargar las máximas crecientes que llegan al vaso de almacenamiento mientras que en los desfuegos de fondo es vaciar parcial o totalmente el embalse en situaciones de emergencia y evacuar la mayor cantidad posible de sedimentos depositados, alargando así la vida útil del embalse. La pérdida en el almacenamiento es causada precisamente por la acumulación de sedimentos en el embalse, aunado al incremento de los niveles de inundación aguas arriba del embalse.

Los desfuegos o descargas de fondo están ubicados dentro del volumen muerto y funcionan, a efectos prácticos, como una toma. Sin embargo pueden existir descargas de fondo situadas a nivel intermedio para contribuir al vaciado parcial de un embalse en caso necesario. Estos suelen llamarse desfuegos intermedios de presa y por lo general se instalan en cortinas de presas de concreto de gran altura.

Para operar estas obras se cuenta con la instalación de compuertas situadas en uno o varios puntos específicos según el diseño del desfogue de fondo. Estas compuertas tiene la capacidad de accionarse, mediante medios mecánicos y manuales, de forma total o parcial para así permitir la descarga del agua a diferentes condiciones de operación, es decir, variando el gasto, la velocidad del flujo, las presiones y las vibraciones.

Como se puede intuir, un desfogue de fondo es de vital importancia en un sistema de almacenamiento de agua, porque pueden servir para controlar situaciones previstas de forma adecuada o incluso para abordar una situación de emergencia que pueda poner en peligro a la misma presa, al ecosistema que la contiene, o incluso a la o las comunidades que puedan estar asentadas en alguna zona hacia aguas abajo. Por ello, su buen funcionamiento, que es absolutamente necesario, dependerá, además de un correcto diseño, del mantenimiento adecuado y constante que se le brinde a estos túneles, incluidos sus compuertas, dispositivos y elementos que los conforman. En la figura 1.1 se puede observar de manera general el desfogue de fondo de una presa, que en este caso en particular son dos túneles.



Figura 1.1. Desfogue de fondo-presa Karún-3, Irán, 2017

1.2 Ubicación de los desfogues de fondo

Como ya se ha mencionado, un desfogue de fondo es un dispositivo de seguridad con el que cuentan las presas para determinadas situaciones. La ubicación de estos túneles de desfogue se encuentra dentro de la cortina de la presa misma o de forma independiente, es decir, a un costado o incluso por debajo del desplante de la cortina. Por lo general, esta ubicación va a depender de un factor, es decir, si se trata de una presa con cortina de concreto o de materiales sueltos, tierra o tierra y enrocado (Torres Herrera, 1987).

Cuando se trata de una presa de gravedad, comúnmente se coloca el túnel de desfogue atravesando la sección de concreto, el trazo puede ser horizontal o con pendiente hacia aguas abajo. Estos conductos normalmente son de sección circular. En algunos casos es posible que se requiera una sección rectangular para la instalación de ciertos tipos de válvula o compuertas, cuando esto sucede, por lo general se construye una sección de transición. Hay proyectos que por sus características de diseño y operación, requieren desfogues en la parte media del cuerpo de la presa, comúnmente llamados desfogues intermedios. En la figura 1.2 se muestra un esquema de desfogues en una presa de concreto.

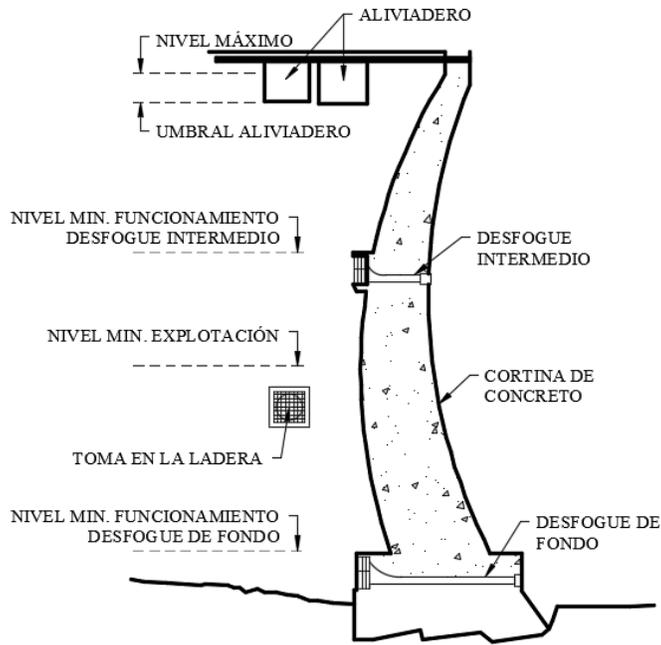


Figura 1.2. Esquema de desfogue intermedio y de fondo en presa de concreto

Por otro lado, cuando se habla de presas con cortinas de materiales sueltos, de tierra o de tierra y enrocado, los desfogues de fondo por lo general se construyen de manera independiente al cuerpo de la presa, principalmente para brindar seguridad a la cortina, ya que puede verse afectada por deslaves provocados por alguna fuga que pueda presentarse en el desfogue de fondo. En otras ocasiones, las obras de desvío son aprovechadas para funcionar como desfogues de fondo una vez concluida la construcción de la presa.

Las secciones mayormente utilizadas en los conductos son la circular y la de herradura. En algunas ocasiones pueden existir tramos de transición, dependiendo del diseño hidráulico. En la figura 1.3 se muestra un esquema de desfogue de fondo con una reducción de diámetro en una presa de materiales sueltos.

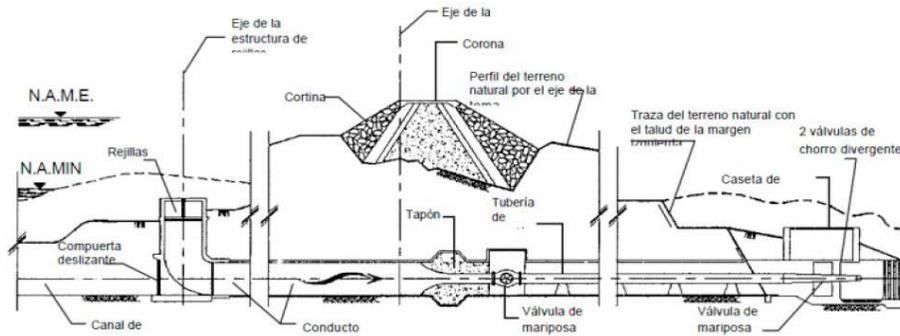


Figura 1.3. Esquema de desfogue de fondo en una presa de materiales sueltos

1.3 Elementos que conforman a los desfogues de fondo

1.3.1 Conducto

Es la estructura por la cual se conduce el agua desde el embalse de la presa hacia el cauce natural aguas abajo, generalmente de un río. La sección hidráulica y estructuralmente más adecuada para un túnel a presión es la circular. Si el túnel trabaja a superficie libre, una sección en herradura o con fondo plano será más eficiente hidráulicamente, pero no tan resistente para las cargas exteriores, como en una sección circular. Para la construcción de estas estructuras, los materiales mayormente utilizados son el concreto, concreto armado, acero y combinados. Por lo general, el diámetro mínimo para este tipo de obras es de 1.80 m.

1.3.2 Estructura de entrada

Es el elemento inicial que conecta directamente al conducto. Esta obra puede situarse de forma horizontal, inclinada o vertical dependiendo de las necesidades existentes. Si se requiere que la entrada tenga una cota más elevada que la del conducto, la toma deberá tener una caída, similar a la de un aliviadero de un pozo (Torres Herrera, 1987).

Una obra de toma puede tener muchas formas, dependiendo de las funciones que deba realizar, de la altura de agua del embalse, acumulación de sedimentos, de las condiciones de la posible capa de hielo, presencia de oleaje, entre otros. Puede ser sumergida o estar ubicada en una torre que se eleve sobre la máxima cota del embalse.

Por otro lado, siendo ésta la obra que da inicio al desfogue, existe la necesidad de instalar, como parte de la estructura de toma, elementos como rejillas que impidan el paso de elementos que puedan dañar el desfogue de fondo en general, es decir, el conducto, los mecanismos de válvulas y/o compuertas. El tipo de rejillas depende de varios factores, tales como la dimensión del conducto, el tipo de dispositivos de control utilizados, de los sedimentos, del uso del agua, del gasto descargado, entre otros. Las figuras 1.4 a 1.7 muestran diferentes configuraciones que suelen usarse en las estructuras de entrada.

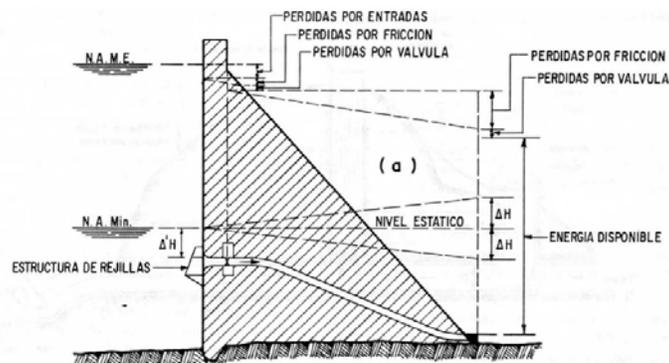


Figura 1.4. Estructura de entrada a través de una cortina de concreto (Torres Herrera, 1987)

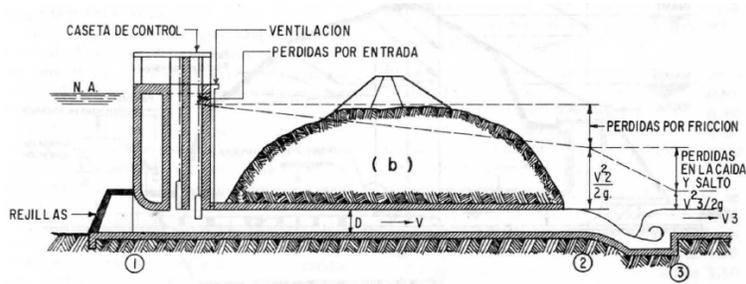


Figura 1.5. Estructura de entrada con torre y túnel a presión en presa de materiales sueltos (Torres Herrera, 1987)

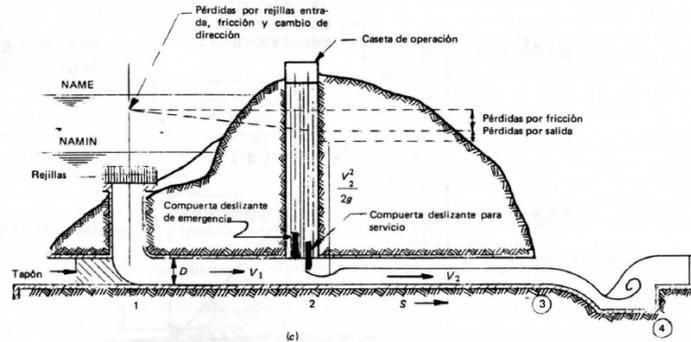


Figura 1.6. Estructura de entrada con tiro vertical, túnel a presión, galería vertical para compuertas deslizantes y conducto abierto, en presa de materiales sueltos (Torres Herrera, 1987)

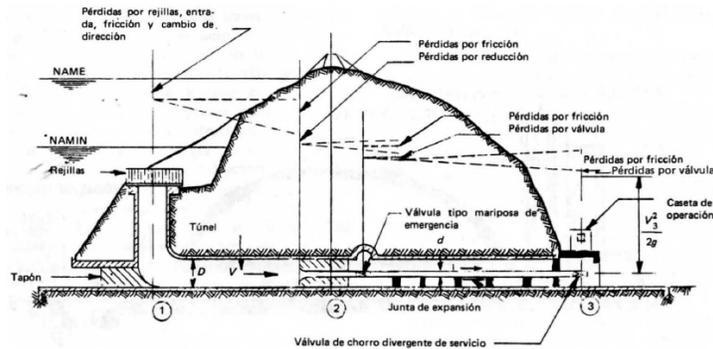


Figura 1.7. Estructura de entrada con tiro vertical, reducción con válvula de mariposa y salida con válvula de chorro divergente, en presa de materiales sueltos (Torres Herrera, 1987)

1.3.3 Dispositivos de control

Los dispositivos de control y regulación son válvulas o compuertas que se accionan de manera automática y manual y, como su nombre lo indica, sirven para controlar las variables hidráulicas del sistema de desfogue, como son la presión, el gasto, la velocidad, el nivel del embalse (Torres Herrera, 1987). La elección de los elementos del desfogue se basa en la utilización de compuertas y válvulas disponibles en el mercado y en algunos casos se puede contar con válvulas de tamaño y especificaciones particulares.

Dentro de un desfogue de fondo la clasificación de las válvulas que intervienen por lo general en el control de desfogue en una presa serían las válvulas de entrada de agua (válvulas de cierre y válvulas de aireación) y válvulas de salida (válvulas de chorro hueco y válvulas de paso anular).

Los dispositivos o válvulas de control por tanto, en esencia, lo que hacen es dificultar el paso del fluido en mayor o menor medida dependiendo del grado de apertura y de las características hidráulicas de la válvula. Así pues estos elementos de regulación provocan pérdida de carga.

Estos dispositivos o válvulas de control se albergan en espacios específico para contenerlas, protegerlas y para poder tener acceso a ellas para su revisión y mantenimiento.

1.3.4 Elementos de descarga

La estructura de descarga puede consistir en válvulas, rejillas u orificios (descarga lámina libre). La salida de un desfogue, ya sea a través de compuertas, válvulas o a superficie libre, se realiza a gran velocidad y en la mayoría de los casos de forma horizontal. Dicha descarga puede efectuarse sin mayor riesgo, siempre y cuando exista un lecho de roca existente a la erosión a poca profundidad en el cauce aguas abajo.

En caso contrario, probablemente las válvulas de chorro hueco (Howell-Bunger o de salida cónica), sean la tipología de válvula óptima más usada para el control de la descarga de una presa. Estas se montan al final del conducto y solo sirven para descarga a atmosfera. Otro elemento que puede ayudar a descargar a los desfogues son estructuras amortiguadoras que sean capaces de disipar la energía de desfogue.

La estructura de disipación de energía más común que se usa con los desfogues de fondo, es el tanque de amortiguación. Este elemento disipa la energía del flujo mediante una estructura escalonada de concreto. El pozo de amortiguación disipa la energía con turbulencias a medida que el caudal llega a un pozo lleno de agua. En la figura 1.8 se muestra un esquema de los elementos básicos que componen un sistema de desfogue de presas.

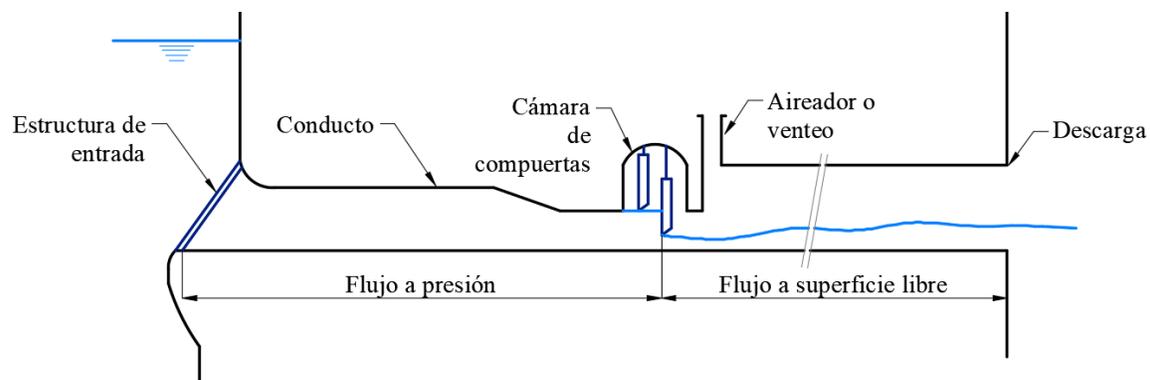


Figura 1.8. Esquema general de un desfogue de presa (modificado de Vischer and Hager, 1998)

1.4 Funciones de los desfogues de fondo

Como ya se ha mencionado, los desfogues de fondo son dispositivos de seguridad de las presas, es por ello que son elementos indispensables para la operación de los embalses. Cabe mencionar que, al funcionar como dispositivos de seguridad, su funcionamiento no es constante y sólo se accionan en casos particulares de seguridad y/o de emergencia. A continuación se enlistan las funciones que tienen las descargas de fondo (CNEGP, González de la Aleja):

- Descargar el caudal del embalse durante el periodo de pruebas (vaciado).
- Vaciar parcial o totalmente el embalse para pruebas de seguridad, reparaciones y/o mantenimiento del sistema de almacenamiento.
- Para garantizar una reserva de regulación frente a avenidas.
- Control del nivel del embalse y eventual vaciado por debajo del umbral del aliviadero.
- Evacuación de avenidas, en combinación con los vertedores o aliviaderos de superficie
- Control del río en fase de construcción (túnel de desvió-desfogue de fondo posterior).
- Limpieza de sedimentos asentados en el embalse.

1.5 Consideraciones técnicas de diseño

El correcto funcionamiento de los desfogues de fondo es indispensable para poder abordar situaciones de riesgo para la presa y su entorno. Para lograr este objetivo es necesario que el diseño hidráulico haya tomado en cuenta criterios de diseño específicos. A continuación se mencionan los más relevantes:

- Procurar que el diseño sea funcional y económico, en cuestiones de construcción y mantenimiento.
- Tener un fácil acceso a los elementos que componen el sistema de desfogue para mantenimiento y supervisión, prolongando así, su vida útil.
- Garantizar un conducto sin fugas para evitar la erosión que pueda llegar a presentarse.
- Buen rendimiento para el flujo bajo aperturas parciales.
- Mantener libre de sedimentos el conducto.
- Correcta selección de dispositivos de control, según los análisis hidráulicos y la disposición del mercado.

Por otro lado, los fenómenos hidráulicos que provoca una apertura parcial de compuertas y/o válvulas, sobre todo aguas debajo de los dispositivos de control, deben evitarse en la mayor medida posible, tales como:

- Velocidades altas (según criterios de diseño).
- Cavitación y por ende erosión.
- Vibración.
- Sub-presiones (presiones por debajo de la atmosférica).

2 Problemas y daños en desfogues de fondo de presas

Los desfogues de fondo y los dispositivos que los integran son esenciales para la seguridad de las presas. El funcionamiento de un sistema de embalse, y más aún en situaciones de emergencia, puede depender de la capacidad hidráulica, estructural y de mantenimiento de dichos sistemas de desagüe en su conjunto.

La mayoría de las obras hidráulicas, y en este caso de los desfogues de fondo, desarrollan afectaciones estructurales y con ello el deterioro de manera progresiva debido al funcionamiento en sí. En algunos casos por el mal diseño hidráulico e incluso por los procedimientos y calidad de la construcción. Otro factor que determina la seguridad es el correcto funcionamiento del equipo mecánico, es decir, de los dispositivos de control, como son las válvulas o compuertas de cierre, dispositivos de aireación y válvulas disipadoras de energía a la salida, según sea el caso.

Cuando surgen eventos naturales como tormentas y con ello avenidas que puedan generar alguna situación crítica dentro del embalse, los dispositivos de desagüe como los aliviaderos y los desfogues de fondo pueden operar a capacidad máxima, lo que podría causar daños de moderados a severos debido a las altas velocidades de descarga, presencia de sedimentos, temperatura, entre otros. Por ello, se deben realizar inspecciones especiales después de tales eventos, incluso después de alguna actividad sísmica u otras circunstancias que puedan haber afectado de alguna manera la estructura y los dispositivos de control (Veesaert, 2007).

Los problemas que pueda presentar un desfogue de fondo también dependerán del material con el que están construidos, por lo general estos materiales son el concreto y el acero. A continuación se describen dichos problemas y daños que se presentan según el tipo de material.

2.1 Problemas y daños en desfogues de fondo de concreto

2.1.1 Agrietamiento

El concreto, al igual que otros materiales de construcción, se contrae y expande con los cambios de humedad y temperatura, y se deforma dependiendo de la carga y de las condiciones de apoyo. La mayoría de las grietas aleatorias que aparecen a edad temprana raramente afectan la integridad estructural o la vida útil del concreto. Las grietas que aparecen a edades posteriores pueden deberse a un deterioro significativo, incluso a la presencia de vibraciones que fatigan la estructura. Si estas vibraciones causadas por el flujo son constantes, dichas grietas tenderían a crecer y el conducto podría fallar por rotura.

La mayoría de las grietas en el concreto ocurren usualmente debido a un diseño y a prácticas de construcción inadecuadas, como puede ser la omisión de juntas de contracción, utilización de un concreto de elevado asentamiento o excesiva adición de agua en el lugar, acabado o curado inadecuado, entre otros (ACI, 2001).

Independientemente del origen de la grieta, se debe prestar atención en las de tipo profunda, ya que estas pueden dañar de manera progresiva la estructura del túnel de desfogue, incluso producirse afectaciones más serias, sobre todo al momento de operación.

2.1.2 Defectos de superficie

Los defectos superficiales son deficiencias que no son de naturaleza progresiva, en otras palabras, no necesariamente se vuelven más extensas con el paso del tiempo. Pueden ser deficiencias en la superficie del concreto, defectos de textura debido a técnicas inadecuadas de construcción y daño localizado en la superficie del concreto.

Entre los tipos más comunes de defectos superficiales se encuentran el panal de abeja, la estratificación, manchas y daños por impacto (Veesaert, 2007).

Panal de abeja: Es un vacío que queda en el concreto cuando el mortero no puede llenar los espacios entre las partículas de agregado grueso de manera efectiva. Este defecto es causado principalmente por malas prácticas de construcción como una mezcla incorrecta del concreto o un mal vibrado después de la colocación.

Estratificación: Es la separación de los agregados del concreto demasiado húmedo o sobre vibrado, dicha separación se presenta en capas horizontales. Por lo general, los agregados se separan, quedando asentados en el fondo los materiales más densos y el material cada vez más pequeño concentrado hacia la parte superior. Esto puede resultar en un concreto con resistencia no uniforme, áreas débiles y por ende una estructura vulnerable a las fuerzas producidas por el flujo del agua y partículas que esta pueda contener.

Manchas: Aunque la decoloración y las manchas a veces están asociadas con el deterioro del concreto, la mayoría de las manchas superficiales solo causan defectos aparentes y no estructurales. Este tipo de defectos pueden ser causados por depósitos de corrosión del acero que compone a los dispositivos de control (válvulas o compuertas), incluso resultado de accidentes de construcción o mantenimiento, por ejemplo el derrame de aceite, grasa, pintura, entre otros. Cabe mencionar que si las manchas son por la corrosión del acero estructural, es evidencia de un daño interno, posiblemente causado por una grieta y la filtración del agua.

2.1.3 Erosión por abrasión

La erosión por abrasión es la pérdida continua de material en la superficie de un cuerpo sólido por efectos abrasivos (Jacobs et al. 2001), es decir, causada por el estrés mecánico producido por el impacto de partículas sólidas transportadas en el agua, como pueden ser la arena, grava, rocas, hielo y otros desechos que inciden en la superficie de cualquier estructura (Graham et al. 1988).

Cuando un desfogue de fondo entra en operación, el agua que es conducida podría llevar sedimentos de diferentes tipos y tamaños y que al ser arrastrados a altas velocidades pueden

afectar la superficie o las paredes de los conductos o túneles de desfogue, desgastando el concreto durante el proceso de descarga. La erosión en el concreto generalmente comienza con el desgaste del material de forma superficial y aparece como un daño relativamente uniforme. En la figura 2.1 se muestran los movimientos típicos de los sedimentos arrastrados por el agua actuando en la superficie de una estructura.

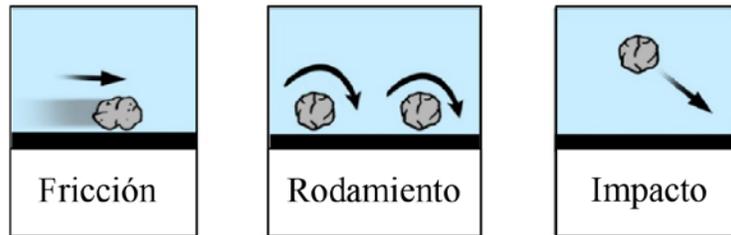


Figura 2.1. Proceso de la abrasión y movimientos típicos de los sedimentos (modificado de Müller-Hagmann, 2017)

El movimiento de los sedimentos, sobre todo el de rodamiento y el de impacto, pueden provocar, aunado a la erosión del material que los contiene, vibraciones debido a la acción directa de dichos sedimentos, y por ende desplazamientos, fatigando a la estructura. Dichas condiciones incluso podrían llevar al colapso un desfogue de fondo.

2.1.4 Erosión por cavitación

La erosión por cavitación es el desgaste o deterioro parcial o total de la superficie de cualquier cuerpo sólido causado por el fenómeno de la cavitación (Graham et al. 1988). Para entender este tipo de daño es necesario conocer dicho fenómeno que a continuación se describe.

Como se mencionó, la cavitación es un fenómeno físico, mediante el cual un líquido, en determinadas condiciones, pasa a estado gaseoso y un instante después pasa a su estado líquido, siendo éste último cambio el origen de la cavitación que más adelante se describe con detalle. Esta condición de cambio de estado depende de dos parámetros principalmente: la temperatura y la presión. Para que dichos parámetros varíen, la velocidad es un tercer elemento que interviene de manera indirecta. En la figura 2.2 se muestran estas dos condiciones mediante la gráfica de presión de vapor del agua.

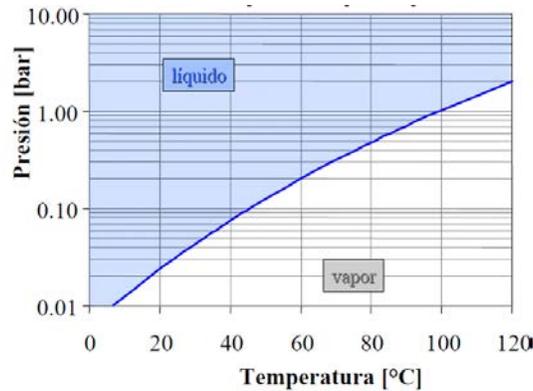


Figura 2.2. Curva característica de la presión de vapor del agua

Para que la presión del agua disminuya a la presión de vapor se necesitan condiciones específicas para lograr este comportamiento. A continuación, esas condiciones se plantean mediante un sistema a presión con válvula reguladora.

En un sistema a presión, el agua, evidentemente, está sometida a presión, producida ya sea por un sistema de bombeo o por la diferencia de alturas entre un punto y otro, y es considerablemente mayor que la presión de vapor. Cuando el agua fluye a través de un estrangulamiento provocado, por ejemplo por una válvula de regulación o control, la presión del agua llega a ser menor que la presión de vapor. Para entender este comportamiento es necesario plantear un balance de energía del fluido según el teorema de Bernoulli que se expresa con la siguiente ecuación (Sotelo, 1997):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.1)$$

El teorema de Bernoulli dice que la energía de un fluido es constante entre dos puntos (como ejemplo, aguas arriba y aguas debajo de una válvula o compuerta), es decir (Sotelo, 1997):

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = C \quad (2.2)$$

La energía total o energía potencial de un fluido que pasa a través de un conducto a presión, está compuesta de distintas formas de energía: energía de pérdida o carga (Z), energía de presión ($\frac{P}{\gamma}$) y energía de velocidad o cinética ($\frac{V^2}{2g}$). Continuando con el ejemplo, debido al estrechamiento de la sección de paso en un punto de regulación, la velocidad del fluido, es decir su energía cinética, aumentan considerablemente. Debido al estrechamiento, las pérdidas también aumentan de forma apreciable. En el punto de regulación la energía de presión restante y por tanto la presión local, decrece considerablemente ya que la energía total debe permanecer constante. En la figura 2.3 se presenta un esquema con lo descrito anteriormente.

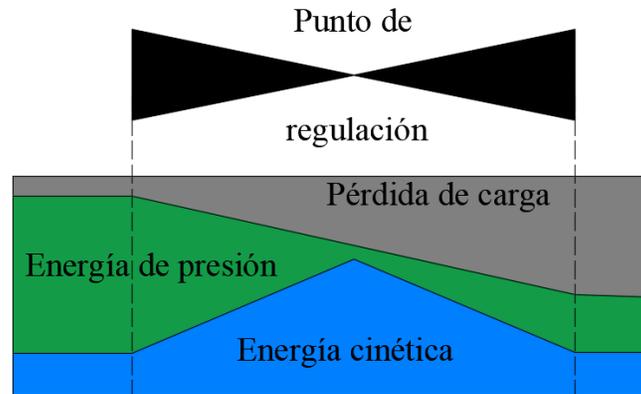


Figura 2.3. Esquema del comportamiento de los tipos de energía en un punto de regulación (Marchegiani, 2006)

Si en el punto de regulación la presión disminuye por debajo de la presión de vapor, el agua puede evaporarse cambiando a estado gaseoso, formando así burbujas de vapor. Estas burbujas son arrastradas a zonas de mayor presión y se van deformando al incrementarse la presión hacia aguas abajo y finalmente colapsan (implotan) regresando así al estado líquido, generando un micro-chorro o micro-jet. Este último elemento puede desaparecer, y en el peor de los casos, golpear las paredes del conducto a muy alta velocidad desgastando o erosionando la superficie y afectando de forma más profunda gradualmente. Este impacto generalmente es acompañado por ruidos, vibraciones, pérdidas y alteraciones de las propiedades hidrodinámicas. La implosión de las burbujas de vapor sigue diferentes direcciones, dependiendo de las condiciones de presión. En la figura 2.4 se muestra el proceso de deformación de las burbujas de vapor.

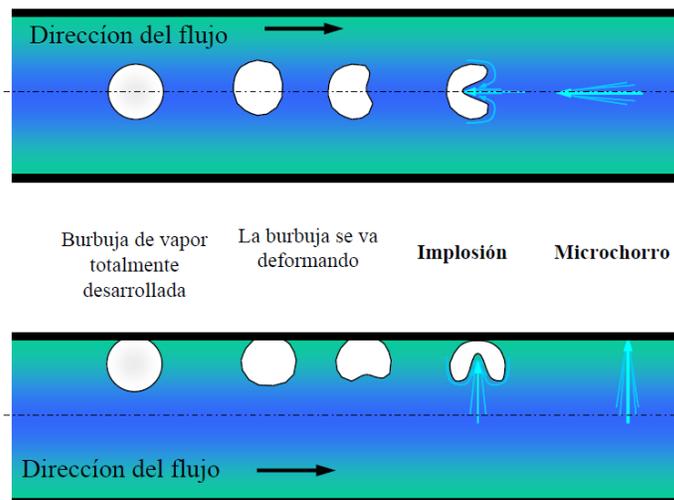


Figura 2.4. Proceso del fenómeno de cavitación en el centro (figura superior) y pared de la tubería (figura inferior)

En desfuegos de fondo de presas la erosión por cavitación se debe al micro-chorro o micro-jet que impacta directamente en la superficie o las paredes del túnel, dicho fenómeno es provocado por el cierre parcial de las compuertas o válvulas de control no aireadas o con aireación deficiente, teniendo como consecuencia la pérdida del material que compone al

conducto. El daño por cavitación aumenta gradualmente, debilitando a la estructura en su conjunto, haciéndola más susceptible a otros esfuerzos como las cargas exteriores, la velocidad del agua, los desplazamientos provocados por vibraciones en respuesta a la acción del flujo turbulento. En algunos casos la socavación en la base del túnel pudiera presentarse debido a un nivel de erosión importante, llevando a este tipo de obras al fallo.

2.2 Problemas y daños en desfuegos de fondo de metal

Los problemas presentados en los desfuegos de fondo de presa construidos con materiales metálicos comparten problemas con los construidos a base de concreto, como son: agrietamiento, ocasionados principalmente por vibraciones, y erosión por cavitación y abrasión, por lo que en este apartado no se detallan dichos conceptos.

2.2.1 Deformación

La deformación de un metal puede ser elástica, es aquella en la que el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca dicha deformación. Por otro lado se tiene la deformación plástica y es cuando el cuerpo no recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.

En los desfuegos de fondo, la deformación plástica o permanente puede ser provocada por un sismo o por el impacto de sedimentos de tamaño importante, que actúen directamente en las paredes del conducto, provocando depresiones o hundimientos superficiales y por ende deficiencias hidrodinámicas y fallos estructurales (Veesaert, 2007).

2.2.2 Corrosión

La corrosión se produce cuando el metal es atacado y su superficie se corroe, es decir se produce un deterioro en el cuerpo del material y hace que se desgaste de manera paulatina. Esto se debe a un proceso o reacción química (oxido-reducción) en la que intervienen factores como la temperatura media, salinidad del flujo en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión.

Cabe mencionar que, en los desfuegos de fondo de concreto, el problema de la corrosión se hace presente en los diversos dispositivos de seguridad y control, como son las compuertas de regulación o las válvulas de salida.

La corrosión desgasta los cuerpos de metal, estos a su vez pierden capacidad a resistir ciertos esfuerzos y por lo tanto los convierte en elementos vulnerables, tanto a los conductos como a los dispositivos que lo componen (Veesaert, 2007).

2.2.3 Fatiga

La fatiga es un proceso de degeneración de un material sometido a cargas constantes o cíclicas de valores por debajo de aquellos que serían capaces de provocar su rotura mediante tracción. Durante dicho proceso puede generarse agrietamiento que, si se dan las condiciones adecuadas, crecerá hasta producir la rotura del cuerpo de metal.

Cuando un desfogue de presa inicia operaciones, las cargas constantes mencionadas son generadas por la fuerza del agua que actúa de manera directa sobre la superficie del conducto provocando en primer lugar vibraciones y como consecuencia desplazamientos y por lo tanto fatiga (Veesaert, 2007).

2.3 Accidentes en desfogues de fondo de presas

Si bien en un desfogue de fondo, como cualquier otra estructura hidráulica, está expuesto a presentar diversos problemas como los mencionados anteriormente y que la magnitud de dicho daño dependerá según se presenten las condiciones que puedan afectar un túnel de estas características, la erosión por cavitación ha tenido relevancia en este tipo de obra por la magnitud del daño que ha provocado en diferentes presas alrededor del mundo.

En estudios posteriores que se han realizado sobre el colapso de los desfogues de fondo, el daño debido al fenómeno de cavitación es el principal causante de los fallos estructurales. Otros aspectos que acompañan a este daño en particular son las altas velocidades de descarga provocando fricción y por ende desgaste. La energía que lleva el agua se transmite a las paredes del conducto por medio de vibraciones constantes que provocan desplazamientos a la estructura y con ello fatiga a la misma. La fatiga, dependiendo de la magnitud de los desplazamientos, puede agrietar y posteriormente llevar a la rotura a un túnel de desfogue, seguido de esto puede iniciarse un proceso de socavación lo que llevaría de un problema particular (cavitación) a un desastre total (fallo de la estructura). Dicho esto, el colapso de un desfogue de fondo va acompañado de una serie de fenómenos y eventos que lo van desgastando paulatinamente, hasta que éste no es capaz de resistir esos embates y falla (Falvey, 1990).

A continuación se presenta la descripción de fallo de desfogues de fondo en presas, puntualizando como primer causante el fenómeno de la cavitación.

2.3.1 Presa Hoover (antes presa Boulder)

En el año de 1941 los problemas por cavitación fueron experimentados con la apertura del túnel de desfogue de la presa Hoover por primera vez. Durante los primeros 4 meses de operación el gasto medio de descarga era de 382 m³/s, pero en el mes de octubre, una de las compuertas de control sufrió un accidente, lo que provocó que el gasto se incrementara a 1076 m³/s por al menos un par de horas (Houston et al. 1987). El causante principal del fallo

del túnel fue la cavitación y el resultado fue un agujero de 35 metros de largo, 9 m de ancho y una profundidad de 14 m en los puntos máximos (Pugh et al., 1988). En la figura 2.5 puede apreciarse la magnitud del daño, incluso la presencia de socavación.



Figura 2.5. Daños provocados por cavitación en el túnel de la presa Hoover (Warren., 2012)

2.3.2 Presa Yellowtail

El desfogue de fondo inicio su descarga en junio de 1967. El 4 de julio de ese mismo año se tenía un gasto de descarga promedio de $425 \text{ m}^3/\text{s}$, pero de repente la presión de descarga disminuyo considerablemente, lo que indico que una disipación de energía se estaba produciendo dentro del túnel. La causa de esa disipación de energía fue un hueco de 14 m de longitud, 5.9 m de ancho y una profundidad de 2.1 m (Pugh et al., 1988). En la figura 2.6 se aprecian los daños causados por cavitación.



Figura 2.6. Daños por cavitación, túnel de la presa Yellowtail (Arndt, 2003)

2.3.3 Presa Glen Canyon

Probablemente el accidente más conocido e importante que se tenga. Los desfogues de fondo, con un diámetro de 12.5 m, fueron diseñados para operar con gastos de $906 \text{ m}^3/\text{s}$ cada uno y entraron en operación en 1980 por periodos de tiempo relativamente cortos. En 1983 debido a la crecida del río Colorado se puso en operación el túnel izquierdo y este funcionó con un gasto de 425 a $566 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 72 horas aproximadamente. La descarga se detuvo debido a fuertes ruidos provenientes del interior del túnel y fue inspeccionado rápidamente. Se encontró dentro del túnel un hueco de 40 m de largo, 15 m de ancho y 10 m de profundidad, además de 230 m^3 de concreto removido, acero de refuerzo y rocas con diámetro de 2.4 a 2.6 m (Pugh et al., 1988). El túnel derecho presento también problemas por cavitación, pero en menor magnitud. Cabe mencionar que para ambos desfogues de fondo (derecho e izquierdo) se tenía contemplado instalar aireadores, pero por razones de seguridad entraron en operación sin estos dispositivos. En la figura 2.7 se aprecian los daños en el desfogue de fondo izquierdo que tuvo mayores afectaciones en comparación con el túnel derecho, las cuales se pueden observar en la figura 2.8.

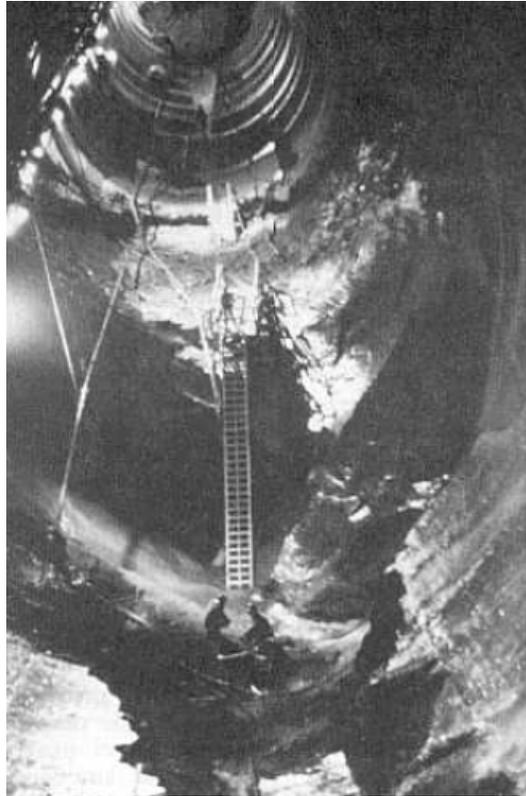


Figura 2.7. Daños por cavitación en túnel izquierdo, Presa Glen Canyon (Falvey, 1990)



Figura 2.8. Daños por cavitación en túnel derecho, presa Glen Canyon (Falvey, 1990)

2.4 Prevención y corrección de daños en desfogues de fondo

Como ya se ha mencionado, los desfogues de fondo pueden presentar diversos problemas, unos con menor o mayor riesgo de fallo que otros, pero que al mismo tiempo todos son importantes a tenerlos en cuenta, ya que como indicador de daño, un colapso es el problema

más devastador que pueden sufrir estos conductos y para llegar a ello se necesita la inclusión de un conjunto de deficiencias para alcanzar dicho punto.

2.4.1 Problemas superficiales

Para prevenir problemas superficiales en este tipo de estructuras, como agrietamientos, deformaciones, corrosión, defectos de superficie, lo ideal es realizar inspecciones constantes como parte de un buen mantenimiento, y más importante aún después de presentarse alguna situación de riesgo, como crecidas en los ríos que alimentan el embalse o sismos.

Por otro lado y con respecto a los dispositivos de control de los desfuegos de presas, se ha mencionado que al ser obras que funcionan con poca frecuencia, y por lo general en situaciones de emergencia, es recomendable realizarles también inspecciones constantes, ya que al estar éstos expuestos y en contacto directo con el agua pueden generarse daños y por ende problemas al momento de la operación, incluso problemas estructurales.

2.4.2 Problemas estructurales

Los causantes de daños importantes a este tipo de estructura son la erosión debido en primer lugar a la cavitación, después a la abrasión, fatiga y agrietamiento debido a vibración.

Para prevenir la cavitación se deben utilizar las válvulas de compuerta o de mariposa completamente abiertas o cerradas y no en posiciones intermedias. Para el caso de requerir la operación de válvulas con aperturas parciales para controlar los gastos de descarga se deben utilizar aireadores como venteos o válvulas aductoras para compensar las diferencias de presiones ocasionadas por el estrangulamiento del flujo y así evitar la cavitación. Cuando el proyecto original carezca de estos dispositivos, se deben hacer adaptaciones para airear las zonas con riesgo a cavitación.

Los refuerzos en ciertas zonas vulnerables a la erosión son necesarias, para así, alargar la vida útil de la estructura.

3 Aireación en desfogues de fondo

3.1 Generalidades

Cuando los desfogues de fondo de presas entran en operación y no descargan directamente a la atmosfera, se producen dentro de estos, altas velocidades que pueden causar presiones por debajo de la presión atmosférica inmediatamente aguas abajo de las compuertas reguladoras. Existen tres elementos principales para que la presión se vea alterada de forma negativa, es decir que sufra una caída, y estos son: el porcentaje de apertura de compuerta, el gasto que se descarga y por ende la velocidad, y de la geometría de la instalación. Al someter la presión del flujo a cambios repentinos puede provocar alteraciones en el sistema hidráulico debido a la aparición de cavitación y vibración.

En los primeros diseños de desfogues de fondo controlados mediante compuertas no se tomaron precauciones frente a problemas de cavitación y vibración. No fue hasta el año de 1908, después de que la presa Roosevelt (EUA) entró en operación sometida a 67 m de carga en el embalse, aparecieron erosión en la superficie del concreto y daños en el metal y sus sistemas de fijación en el túnel de desfogue. Una vez reparado el daño, se puso en funcionamiento (sin aireación) y los problemas siguieron apareciendo. Otro caso fue la presa Pathfinder (EUA), que en el año 1909 inicio su operación el desfogue, acompañado de ruidos dentro del túnel que aumentaban de intensidad conforme aumentaba el gasto de descarga, teniendo como resultado final problemas de erosión por cavitación, por lo que colocaron aireadores aguas abajo de las compuertas. Esta solución resulto bastante efectiva al momento de reiniciar las operaciones de desfogue.

A partir de los casos mencionados, en los desfogues de fondo, operados mediante compuertas o válvulas de regulación, se diseñan dispositivos de aireación para introducir aire dentro del túnel aguas abajo de dichas compuertas y de esta manera mantener un equilibrio en la presión de operación del desfogue de fondo y así evitar daños a la estructura en general. Los aireadores son dispositivos que suministran aire de forma natural o artificial a los conductos que así lo requieran.

Las funciones principales de lo aireadores son reducir o eliminar la presión sub-atmosférica en el conducto durante la apertura de la compuerta de forma parcial o cierre de emergencia, permitir el correcto drenaje o desfogue en el conducto, y permitir que escape el aire cuando se llena el conducto.

Dentro de un desfogue de fondo pueden aparecer 5 tipos de flujos de aire que interactúan en el sistema. En la figura 3.1 se muestra un esquema de aireación con los flujos de aire que interactúan dentro de un desfogue de fondo al momento de una descarga.

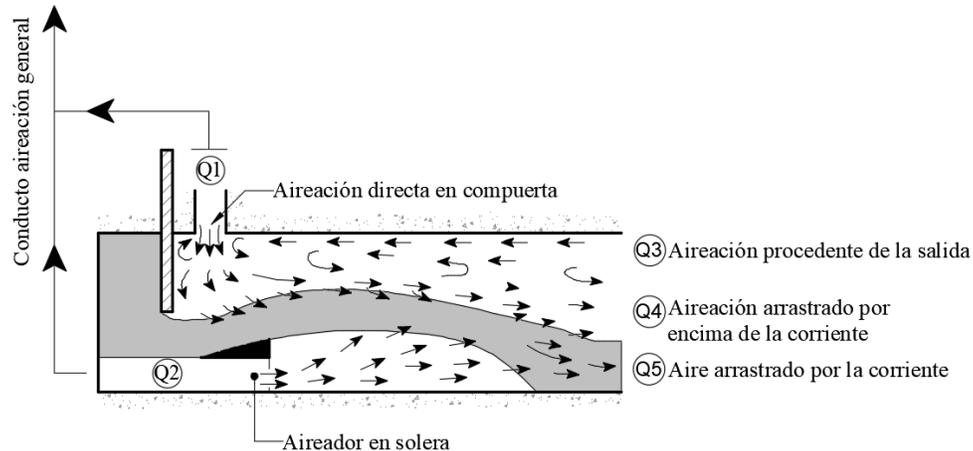


Figura 3.1. Esquema de flujos de aire habituales en desfogues de fondo (CNEGP, 1997)

La demanda de aire que debe suministrar el dispositivo de aireación (Q1) viene determinada por el arrastre de aire que provoca el flujo básicamente a través del contorno superior (Q4), descontando el caudal proveniente de la salida del desfogue (Q3). En la práctica es frecuente dimensionar sin tener en cuenta ese caudal (Q3), de modo que el dispositivo pueda suministrar todo el caudal de aire necesario por sí mismo.

3.2 Tipos de flujo y mecanismos de la aireación

Los túneles de desfogue operan de manera distinta aguas arriba y aguas abajo de una compuerta reguladora, las diferencias recaen directamente en la velocidad y presión del flujo, el comportamiento de este último parámetro ha sido motivo de estudio y en 1976, Sharma, dentro de una investigación hizo una clasificación del tipo de flujo aguas abajo de la compuerta, básicamente esa clasificación se hizo en 2 categorías principales, sin salto y con salto hidráulico, y estas a su vez en tres subcategorías.

- a) Flujo de aire sin agua. Se genera flujo de aire cuando la compuerta está completamente cerrada y no hay flujo de agua. Dependiendo de la interacción de la temperatura dentro y fuera del conducto, el flujo de aire puede moverse en diferentes direcciones. (Pozo et al. 2014)
- b) Flujo sin salto hidráulico
 - Flujo pulverizado. Se produce con pequeñas aperturas de compuerta, inferiores al 10%. El flujo al pasar a través de la compuerta se descompone, formando una nube de minúsculas gotas que obstruyen gran parte del desfogue y arrastran cantidades importantes de aire.
 - Flujo supercrítico en lámina libre. Puede ser, según la porción agua-aire, en forma ondulatoria, estratificada o a impulsos (Favley, 1980)
 - Flujo emulsionado. El flujo se llena con una mezcla casi uniforme de agua y aire, sin entrar en carga.
- c) Flujo con salto hidráulico

- Flujo en lámina libre. En el inicio del salto hidráulico se produce un arrastre importante de aire.
- Flujo en carga. Se forma con salto no sumergido y el flujo se mantiene en carga a lo largo de todo el desfogue. En el inicio del salto se produce un arrastre importante de aire.
- Flujo con salto ahogado o sumergido. Se forma un salto sumergido y el flujo se mantiene en carga a lo largo de todo el desfogue. No se produce arrastre de aire.

En la figura 3.2 se muestra un esquema de los tipos de flujo aguas abajo de una compuerta de regulación en un túnel de desfogue de fondo.

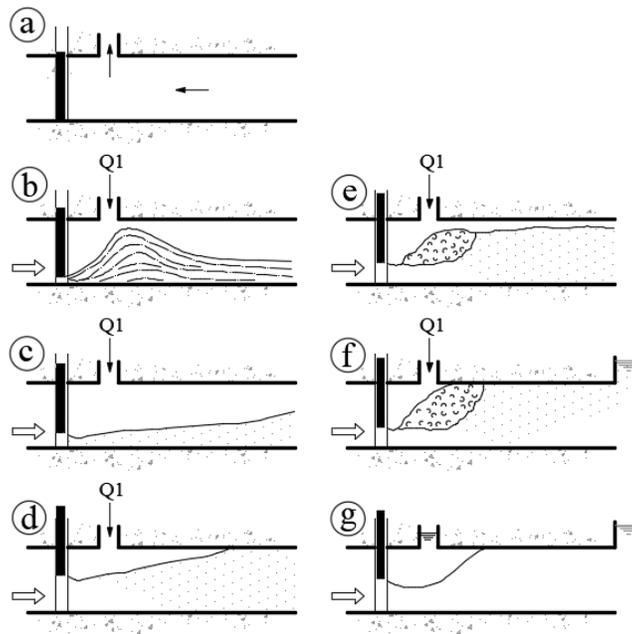


Figura 3.2. Tipos de flujos en desfogues de fondo. a) Flujo de aire. b) Flujo pulverizado. c) Flujo supercrítico en lámina libre. d) Flujo emulsionado. e) Salto hidráulico. f) Salto Hidráulico en carga. g) Salto hidráulico sumergido (modificado de Pozo et al., 2014)

Los mecanismos de aireación en los desfogues de fondo, al igual que los aliviaderos, son debido a la turbulencia del flujo. Sin embargo entre ambos procesos existen diferencias significativas como son la posibilidad de diferentes tipos de flujo o el desarrollo de velocidades, en general y especialmente en la salida de los dispositivos de cierre, mayores que en los aliviaderos, las cuales van decreciendo a lo largo del túnel de desfogue.

Un salto hidráulico es un fenómeno local que se presenta en el flujo rápidamente variado, el cual va siempre acompañado por un aumento súbito del tirante y una pérdida de energía considerable en un tramo relativamente corto. Un salto hidráulico genera pérdida de energía, turbulencia y por ende introducción de aire al flujo.

3.3 Demanda y suministro de aire

La demanda de aire depende principalmente del tipo del flujo que se establezca en el túnel de desfogue, del tipo de compuerta o válvula que controlen la descarga y de sus grados de apertura. El diseño del sistema de aireación se realiza a partir del caudal máximo que es necesario suministrar para mantener la presión del flujo estable, es decir, tener una presión fuera de los límites que generan cavitación.

Varios autores realizaron investigaciones y mediciones en prototipos para determinar la demanda de aire que pueda requerir un conducto de desfogue según sus características generales. Sus análisis a su vez produjeron una serie de resultados que variaban dependiendo del autor y se desarrollaron varias fórmulas para calcular la relación de demanda de aire, que está dada por la siguiente expresión (Erbisti, 2014):

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (3.1)$$

donde Q_a es el caudal de aire en el dispositivo de aireación y Q_w el caudal de agua que fluye bajo la compuerta.

La relación del coeficiente de aireación es una función de varios parámetros, como la geometría del conducto y la compuerta, la velocidad y la profundidad de la vena contracta y la altura del agua. De manera general la mayoría de las publicaciones sugieren la siguiente fórmula para determinar la relación de demanda de aire:

$$\beta = K(F_c - 1)^n \quad (3.2)$$

donde F_c es el número de Froude en la vena contracta, K y n son coeficientes empíricos que varían con cada autor.

El número de Froude está definido por (White F. M., 2008):

$$F_r = \frac{V_c}{\sqrt{gh_c}} = \frac{\sqrt{2gH}}{\sqrt{gh_c}} = \sqrt{\frac{2H}{h_c}} \quad (3.3)$$

donde V_c es la velocidad del flujo en la vena contracta, h_c es la profundidad del agua en la vena contracta y H es la altura efectiva en la vena contracta.

Como se comentó anteriormente, el valor de los coeficientes K y n van a depender de cada autor. Dentro de esos trabajos de investigación destacan los siguientes:

Kalinske y Robertson (1943) fueron los primeros autores en realizar pruebas que relacionan la demanda de aire en túneles de desfogue. Ellos publicaron sus resultados de esa demanda cuando se forma un salto hidráulico dentro de la tubería:

$$\beta = 0.0066(F_c - 1)^{1.40} \quad (3.4)$$

Campbell y Guyton (1953) señalaron que la demanda máxima de aire ocurre cuando la compuerta en cuestión se encuentra abierta al 80% y recomendaron que la velocidad máxima del aire en el dispositivo de aireación debería limitarse a 45 m/s:

$$\beta = 0.04(F_c - 1)^{0.85} \quad (3.5)$$

Así mismo, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (1964) determinó que la demanda máxima de aire ocurre en una abertura de compuerta del 80%. Además concluyeron que si la compuerta es biselada (en ángulo de 45°), esa demanda de aire máximo podría reducirse hasta en un 20%. También recomendaron que la velocidad en el conducto aireador se limite a 45 m/s:

$$\beta = K(F_c - 1) \quad (3.6)$$

El coeficiente K adopta diferentes valores, éstos dependen de tres categorías: a) K tiene un valor que va de 0.025 a 0.04 cuando el túnel es de forma circular y no sufre ninguna transición. Para el siguiente caso b) K tendrá un valor de 0.04 a 0.06 si presenta una transición progresiva de sección circular a rectangular, seguida de una transición muy progresiva (ángulo invertido con una sección horizontal inferior a 10° a circular). Finalmente para el tercer caso c) K adopta valores de 0.08 a 0.12 si el túnel presenta una transición rápida de sección circular a rectangular y de sección rectangular a circular (Levin, 1965). En la figura 3.3 se presenta de manera gráfica lo descrito anteriormente.

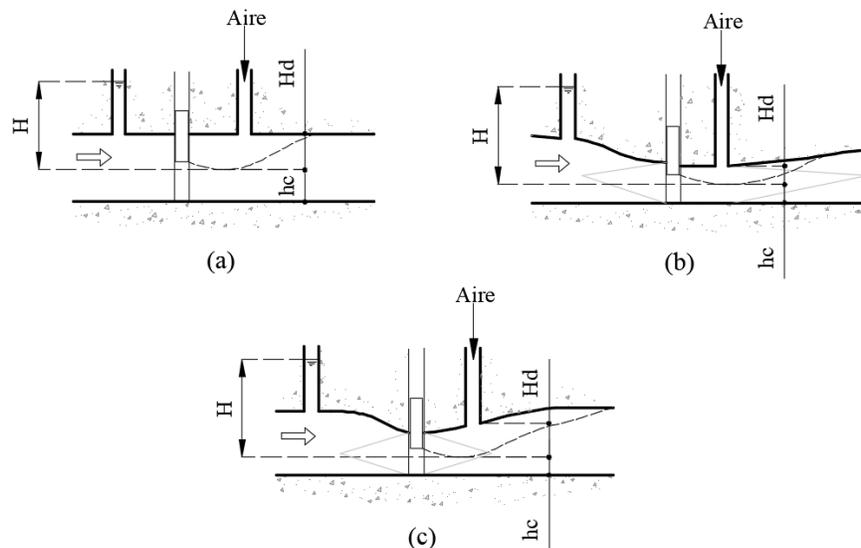


Figura 3.3. Geometría y transiciones en un túnel de desfogue (Levin, 1965)

Como se mencionó en el apartado 3.2, Sharma (1976) clasificó el tipo de flujo que se desarrolla aguas abajo de la compuerta de regulación, por lo que propuso, similar a Levin (1965), tres expresiones para determinar esa relación de demanda de aire.

- a) Flujo sin salto hidráulico

- Flujo pulverizado:

$$\beta = 0.2F_c \quad (3.7)$$

- Flujo supercrítico en lámina libre:

$$\beta = 0.09F_c \quad (3.8)$$

- b) Flujo con salto hidráulico:

$$\beta = 0.0066(F_c - 1)^{1.4} \quad (3.9)$$

La demanda máxima de aire requerida por un sistema de desfogue, operado por compuertas reguladoras, se alcanza cuando el porcentaje de apertura de éstas llega a un 80%. Cabe mencionar que en los ensayos que realizó el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, 1964) encontraron un primer máximo del 5% al 10% (flujo pulverizado), alcanzándose otro máximo al 80% de apertura. Por esa razón es conveniente realizar también el cálculo del caudal de aire para aperturas del 5% y 10%.

3.4 Dimensionamiento del aireador

3.4.1 Flujo de aire y agua

La relación de demanda de aire en los dispositivos aireadores involucra dos términos que son el gasto de agua y gasto de aire. De acuerdo con Levin (1965), el caudal de aire en el dispositivo aireador es:

$$Q_a = 28m_a S_a \sqrt{2gH_d} \quad (3.10)$$

donde Q_a es el caudal de aire, m_a es el coeficiente de flujo en el aireador, S_a es el área transversal del aireador, g es la aceleración de la gravedad y H_d es la depresión aguas abajo de la compuerta (figura 3.3)

Para el caudal del agua se tiene la siguiente expresión:

$$Q_w = B_c h_c \sqrt{2gH} \quad (3.11)$$

donde B_c es el ancho, h_c la profundidad del agua en la vena contracta y H es la altura efectiva en la vena contracta, como se muestra en la figura 3.3.

Así mismo, la velocidad en el conducto aireador depende directamente de la depresión H_d (figura 3.3):

$$V_a = 28m_a \sqrt{2gH_d} \quad (3.12)$$

donde V_a es la velocidad de entrada de aire, m_a es el coeficiente de flujo en el aireador, g es la aceleración de la gravedad y H_d es la depresión.

3.4.2 Coeficiente de flujo en el aireador

Levin (1965) calcula el coeficiente de flujo en el dispositivo de aireación usando la ecuación:

$$m_a = \frac{1}{\sqrt{\sum C_o + \lambda \frac{L}{d}}} \quad (3.13)$$

donde $\sum C_o$ es la suma de los coeficientes de pérdida como entrada, salida, codos, curvas, mallas, rejillas y compuertas, λ es el coeficiente de pérdida por fricción, L y d son la longitud y el diámetro del aireador respectivamente.

3.4.3 Pérdidas en el aireador

El coeficiente de fricción en el aireador puede determinarse con precisión en el diagrama de Moody, en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. El número de Reynolds está dado por (White F. M., 2008):

$$R_e = \frac{V_a d}{\nu} \quad (3.14)$$

donde R_e es el número de Reynolds, V_a es la velocidad del aire en cm/s, d es el diámetro del aireador y ν es la viscosidad cinemática del aire en cm^2/s .

La viscosidad cinemática del aire a una temperatura de 20°C puede tomar el valor de $0.15 \text{ cm}^2/\text{s}$ (White F. M., 2008).

Para la rugosidad ε , se mencionan los materiales más comunes en estos dispositivos de aireación:

- Concreto, $\varepsilon = 0.03 \text{ cm}$
- Acero galvanizado, $\varepsilon = 0.015 \text{ cm}$
- Acero al carbón, $\varepsilon = 0.005 \text{ cm}$

Así mismo, los siguientes coeficientes de fricción λ pueden usarse como valores promedios (Erbisti, 2014):

- Concreto, $\lambda = 0.015$
- Acero, $\lambda = 0.012$

Los coeficientes de pérdida pueden ser calculados de acuerdo a las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 que fueron desarrolladas para aireadores de sección circular (Erbisti, 2014).

- Pérdida a la entrada, $C_o = 0.5$
- Pérdida a la salida, $C_o = 1.0$

c) Pérdida por obstrucciones como malla o rejillas que protegen al conducto aireador

$$n = \frac{S_g}{S_a} \tag{3.15}$$

donde S_g es el área neta de la malla o rejilla y S_a es el área transversal del aireador.

n	0.30	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.90	1.00
C_o	6.20	3.00	1.70	1.30	0.97	0.75	0.58	0.44	0.32	0.14	0.00

Tabla 3.1. Coeficiente de pérdida local por malla o rejilla (ASHRAE, 1981)

d) Pérdida por codos

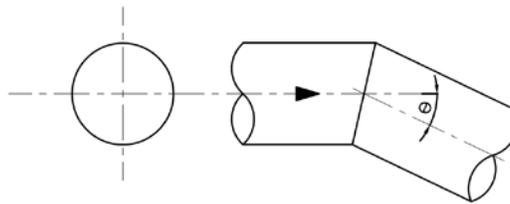


Figura 3.4. Esquema de ángulo en codo

Θ	20	30	45	60	75	90
C_o	0.08	0.16	0.34	0.55	0.81	1.20

Tabla 3.2. Coeficiente de pérdida por codo (ASHRAE, 1981)

e) Pérdida por codos con radio suavizado

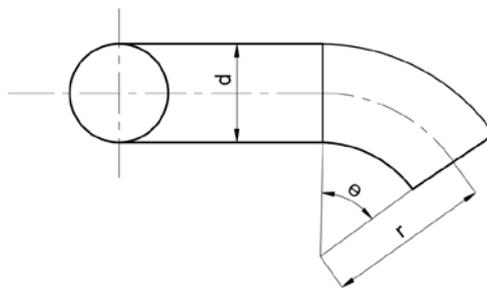


Figura 3.5. Esquema de ángulo y radio en codo con cambio de dirección suavizado

		r/d						
		Θ	0.5	0.75	1	1.5	2	2.5
C_o	30	0.32	0.15	0.1	0.07	0.06	0.05	
	45	0.43	0.2	0.13	0.09	0.08	0.07	
	60	0.55	0.26	0.17	0.12	0.1	0.09	
	90	0.71	0.33	0.22	0.15	0.13	0.12	

Tabla 3.3. Coeficiente de pérdida por codo con cambio de dirección suavizado (ASHRAE, 1981)

El cálculo del coeficiente de flujo del aireador generalmente se realiza mediante prueba y error. Para iniciar con este cálculo previamente se necesita conocer la geometría del aireador y de un valor estimado para el diámetro. Con estos variables se determinan las pérdidas de carga y el área de la sección transversal, posteriormente se verifica el diámetro propuesto

inicialmente. Si el valor del diámetro resultante difiere del inicial se selecciona otro valor y se repite el cálculo.

3.4.4 Aireadores con sección transversal rectangular

Los dispositivos de aireación de sección transversal rectangular se calculan como si fueran de sección circular. La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, 1981), utiliza una ecuación de equivalencia de las secciones circulares y rectangulares para aireadores de la misma longitud, pérdidas de flujo y carga:

$$D_e = 1.3 \sqrt[8]{\frac{(ab)^5}{(a+b)^2}} = 1.3 \frac{(ab)^{0.625}}{(a+b)^{0.25}} \quad (3.16)$$

donde D_e es el diámetro de la sección circular equivalente, a y b son las dimensiones de la sección rectangular.

Para el caso de una sección transversal cuadrada, la equivalencia viene dada por:

$$D_e = 1.093a \quad (3.17)$$

donde a es la longitud del lado cuadrado.

Cabe mencionar que parte del interés en la presente tesis es determinar la demanda de aire (Q_a) que requiere el dispositivo de aireación o venteo por medio de la medición de la velocidad (V_a), y la medición de presión en el venteo debida a la demanda de aire del mismo, dichos parámetros estarán sometidos a diferentes condiciones de operación. A manera general esas condiciones engloban 5 diferentes gastos, 6 porcentajes de apertura de compuerta circular y 2 tipos de flujo aguas abajo de la compuerta, es decir, lámina libre y salto hidráulico. Aunado a lo anterior, se realizarán las mediciones de presión simulando un desfogue de fondo sin dispositivo de aireación que más adelante se detalla.

4 Vibración y desplazamiento

4.1 Estudio en obras hidráulicas / estado del arte

El estudio de las vibraciones y los desplazamientos que producen en las estructuras hidráulicas, y particularmente en conductos circulares, ha sido un tema relativamente nuevo. Las investigaciones se centran principalmente en el análisis espectral de señales de vibración y desplazamientos que se pueden presentar debido a diferentes condiciones de operación de dichas estructuras, tales como gasto, velocidad, turbulencia, materiales del conducto y características geométricas, llámese diámetro y cédula. A continuación se hace mención de algunas investigaciones que plantean el estudio de las vibraciones.

Wang et al. (2017) presentaron un artículo que habla del estudio de la vibraciones en un muro guía debido a la descarga que se presenta en la presa Xiangjiaba, en China. Principalmente se centraron en medir los desplazamientos de la estructura en tres direcciones: axial (x), tangencial (y) y radial (z), orientaciones con respecto a la dirección de flujo. En la figura 4.1 se muestra una gráfica del desplazamiento obtenidos del muro guía a lo largo del tiempo.

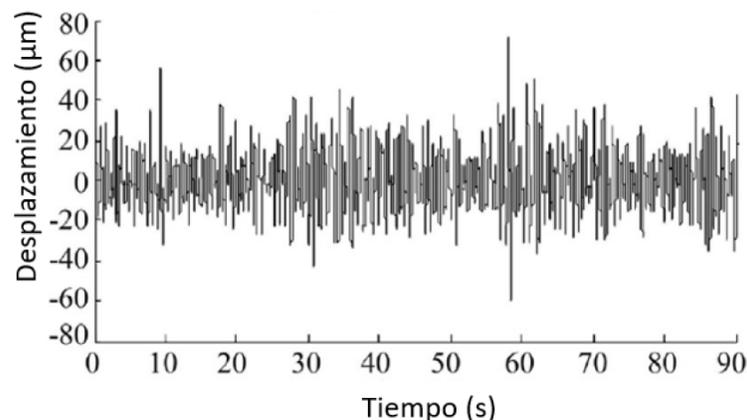


Figura 4.1. Desplazamiento perpendicular en micrómetros del muro guía, presa Xiangjiaba, China (Wang et al. 2007)

Thompson (2009) realizó una investigación experimental sobre un modelo de tubería de PVC de diferentes diámetros y cedulas, sus mediciones contemplaron flujo turbulento (salto hidráulico) y diferentes puntos de sujeción del tubo (apoyos). Los datos obtenidos fueron vibración (aceleración) y presión. El objetivo de su investigación fue comparar diferentes gastos y velocidades para el flujo, y distintos diámetros y cedulas para el conducto, y así poder ver si las características de la tubería aunada a las condiciones de operación, influían en la intensidad de vibraciones. La figura 4.2 muestra los resultados de vibración (aceleración) versus presión.

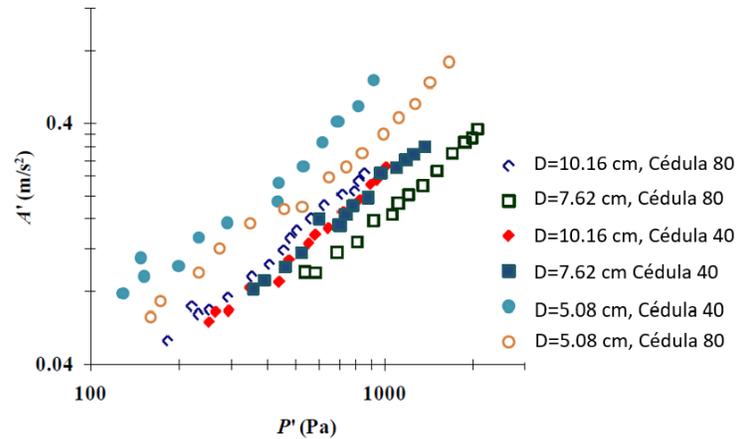


Figura 4.2. Vibración (aceleración) en función de la presión para 6 tipos diferentes de tubería (modificado de Thompson, 2009)

Además de otros resultados complementarios en su investigación, el autor concluye que las vibraciones dependen de la velocidad del flujo, el diámetro y cédula de la tubería. Dichas vibraciones también cambian cuando el tramo en estudio se sujeta o fija en algunos puntos y si se trabaja con flujo turbulento.

Seguel (2014) llevo a cabo un trabajo de investigación que explora la frecuencia de las vibraciones en una tubería de acrílico. La investigación consistió en medir las vibraciones en la parte superior de una tubería, sin y con salto hidráulico. Para su trabajo, utilizó placas perforadas para generar el salto hidráulico.

Para ello, tuvo que conocer primeramente el rango de frecuencia de vibración del tubo. Esto lo realizó mediante la prueba de impacto, que consistió (en este caso particular) en colocar en 6 posiciones, en la parte superior del tubo, un acelerómetro (sensor) que registra vibraciones. Él generó golpes en la tubería (vacía, nivel medio y parcialmente llena) usando un martillo el cual excitaba a la estructura en cuestión. Una vez obtenido la información de los sensores, ésta se procesó mediante un análisis espectral (Transformada de Fourier) obteniendo así los resultados mostrados en la figura 4.3.

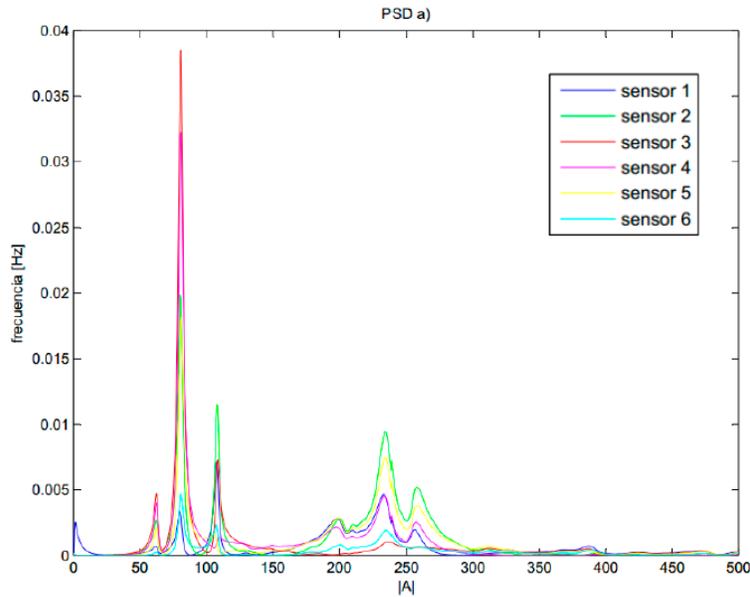


Figura 4.3. Respuesta natural de la tubería vacía (Seguel, 2014)

Con la información anterior se determinó que las frecuencias características de la tubería se encuentran por *debajo de los 400 Hz*. Este valor es preciso conocerlo, ya que indica en qué frecuencias se tienen las mayores concentraciones de energía.

Además, al analizar sus resultados finales, se dio cuenta que la frecuencia de las vibraciones dependen del nivel de llenado de la tubería, y la distancia con respecto a las placas perforadas, es decir a medida que se aleja el sensor de éstas, las vibraciones aumentan.

Lian et al. (2019) escribieron un artículo sobre el mecanismo de las vibraciones en un muro guía de un vertedor que forma parte de la presa de Las Tres Gargantas en China. Los estudios sobre el mecanismo de vibración se centraron en las vibraciones causadas por el flujo en el prototipo.

En dicho trabajo se procesaron los datos de vibración, obteniendo como resultado el desplazamiento en micrómetros en dos sentidos, horizontal y vertical, como se muestra en la figura 4.4.

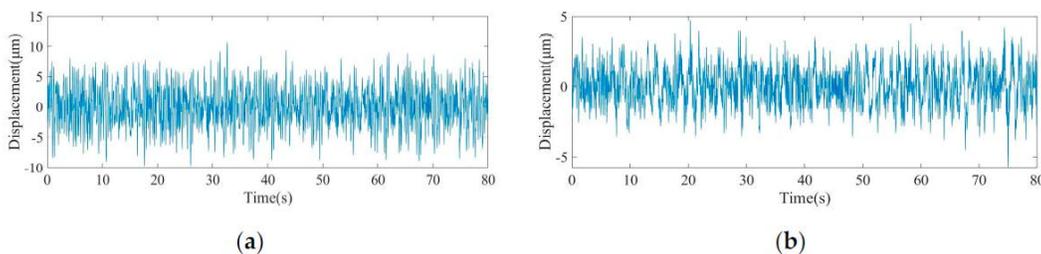


Figura 4.4. Desplazamiento horizontal (a) y vertical (b) en micrómetros, muro guía, presa de las Tres Gargantas, China (Lian et al. 2019)

Aquí se observó que las vibraciones en el muro guía se vieron influenciadas por las vibraciones de la presa, la posición del muro guía y la zona de disipación de energía. Además,

los desplazamientos fueron diferentes en el sentido de medición. Se determinó que los desplazamientos más grandes se ubicaron en el sentido horizontal del muro guía.

Teniendo como antecedentes los problemas que se han presentado en desfuegos de fondo de las presas (capítulo 2) y las investigaciones descritas anteriormente, surge la idea de estudiar estos dispositivos, principalmente el comportamiento que puede experimentar el conducto mediante condiciones hidráulicas específicas, tales como el gasto, porcentaje de apertura de compuerta, la presencia de salto hidráulico y si el conducto cuenta o no con un venteo. El objetivo principal de la presente tesis es determinar, por medio de la medición y análisis de vibraciones, el desplazamiento que puede sufrir un túnel de desfogue de fondo de una presa y determinar qué zonas del conducto son más vulnerables.

4.2 Vibración

Una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento (White G., 1990-2010).

El movimiento vibratorio de un cuerpo entero se puede describir completamente como una combinación de movimientos individuales de tipos diferentes. Esos son traslaciones en las tres direcciones ortogonales, x, y, z y rotacionales alrededor de los ejes x, y, z. Cualquier movimiento complejo que el cuerpo pueda presentar se puede descomponer en una combinación de esos seis movimientos (White G., 1990-2010).

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar al objeto de forma externa o puede tener su origen en el interior de dicho objeto. Este último es el caso de estudio, el desfogue de fondo de una presa es el objeto y la fuerza de excitación interna es el agua que fluye a través de él. La frecuencia y magnitud de la vibración de un objeto están determinados por la fuerza de excitación, su dirección y frecuencia (White G., 1990-2010).

4.3 Representación de la vibración

4.3.1 Vibración simple

La vibración es el movimiento que resulta de una fuerza oscilatoria y de un sistema mecánico lineal. La vibración es registrada gráficamente por medio de curvas u ondas las cuales pueden ser descritas matemáticamente mediante las funciones seno y coseno. A este tipo de grafica se le conoce como *onda senoidal o sinusoidal* y es la representación más básica, en este caso, de las vibraciones. Se trata de funciones repetitivas, lo que significa periodicidad (A-MAQ

S. A., 2005). En la figura 4.5 se muestra una gráfica de una onda senoidal o señal de vibración simple.

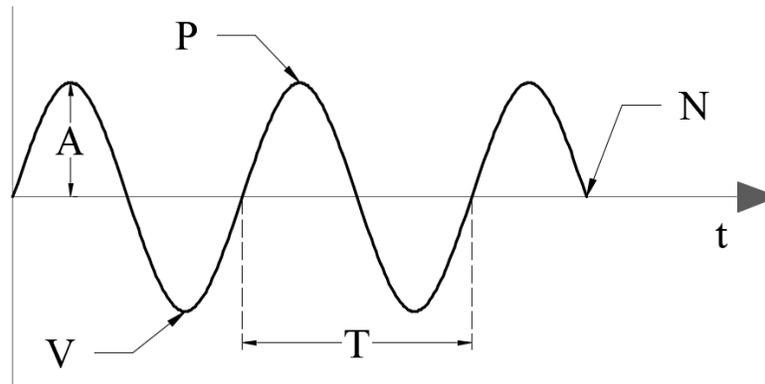


Figura 4.5. Señal de vibración simple o senoidal y sus componentes

Los componentes de una onda senoidal son:

- El periodo, T : Es el tiempo que invierte la onda en realizar un ciclo, su unidad es el segundo (s)
- Frecuencia, f : Es el número de ciclos que tienen lugar en la unidad de tiempo. Su unidad es ciclos por segundo, también llamado Hercio o Hertz (Hz).

El periodo (T) y la frecuencia (f) son inversos: Si en t segundos la onda avanza 1 ciclo, en 1 segundo efectuará f ciclos.

$$f = \frac{1}{T} , T = \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

- Amplitud: Es el valor máximo de la función.
- P: Es el valor pico positivo de la onda, también conocido como cresta.
- V: Es el valor pico negativo de la onda, también conocido como valle.
- N: Es el nodo o valor cero.

4.3.2 Vibración compuesta

Si existen varias frecuencias y éstas a su vez ocurren al mismo tiempo, entonces la vibración resultante será una suma de las vibraciones de alta y baja frecuencia, es decir, la sumatoria de varias señales senoidales (A-MAQ S.A., 2005). Bajo esas condiciones la forma de la onda resultante no será senoidal, sino una *onda compuesta* y puede ser muy compleja. En la figura 4.6 se muestra un esquema de una señal de vibración compuesta así como las ondas senoidales o vibraciones simples que la componen.

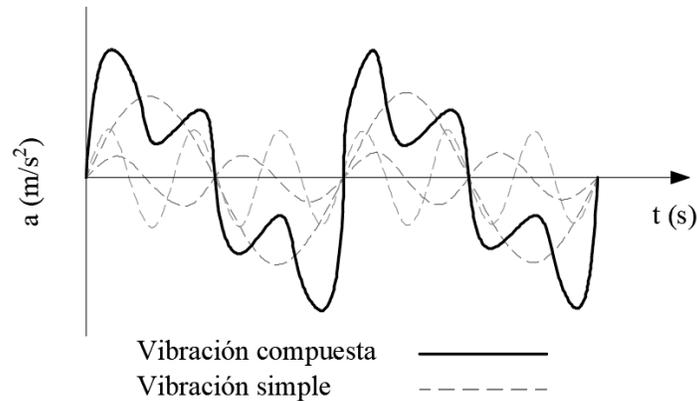


Figura 4.6. Señal de vibración compuesta

4.3.3 Vibración aleatoria

Dentro de un conducto en el que se regula el caudal mediante compuertas con apertura parcial, el agua sufre cambios en su comportamiento hidrodinámico, particularmente alteraciones en la energía del flujo (capítulo 2). Dichos cambios o alteraciones son transmitidos al conducto mediante vibraciones. La energía en estas condiciones presenta un comportamiento lineal pero no uniforme, ya que existe la presencia de aire como se explicó en el capítulo 3, el cual afecta directamente al flujo. Por ello la magnitud de la energía, y por ende las vibraciones, van cambiando dentro de un rango lineal, de forma aleatoria a lo largo del tiempo.

Como se ha mencionado, las vibraciones son señales representadas por medio de ondas senoidales las cuales pueden ser simples o compuestas. Dentro de las señales senoidales existe una subdivisión del tipo de señal: Señal Estacionaria y No estacionaria. Así mismo una *señal estacionaria* puede ser determinística o aleatoria (White G., 1990-2010), siendo esta última la de interés por lo descrito en el párrafo anterior.

Las señales estacionarias son impredecibles en cuanto a su contenido de frecuencia y a su nivel de amplitud, pero conservan características estadísticas relativamente uniformes. La vibración aleatoria no cumple con patrones concretos que se repiten constantemente o es prácticamente imposible detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas generalmente a la turbulencia presente, por ejemplo, en el equipo de bombeo hidráulico o cavitación en bombas (White G., 1990-2010). En la figura 4.7 se muestra una señal de vibración aleatoria en el dominio del tiempo, también se le conoce como señal estacionaria aleatoria.

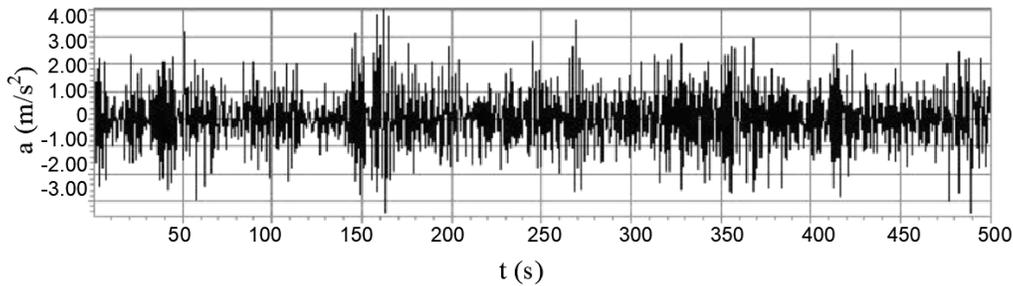


Figura 4.7. Señal de vibración aleatoria o estacionaria-aleatoria (modificado de A-MAQ S.A., 2005)

Como se puede observar, el análisis de este tipo de señal (Figura 4.7) en comparación con una señal senoidal simple (figura 4.5) se vuelve bastante complicado, ya que no se puede definir con facilidad las componentes de ésta como son las frecuencias o amplitud de onda presentes. Es por ello que se tiene la necesidad de realizar un análisis matemático que modifique la apariencia de la señal, que por lo general está ubicada en el dominio del tiempo, y transformarla al dominio de frecuencia, llamado *análisis de frecuencia o análisis espectral*.

4.4 Análisis espectral

Anteriormente se ha mencionado el tipo de vibraciones que componen a una señal de vibración compleja, éstas a su vez presentadas en el dominio del tiempo (t). En este tipo de señales se encuentra toda la información acerca del comportamiento de un cuerpo sometido a vibración. Estas señales presentan mucha información en forma muy compleja.

Existen otras formas de analizar una señal de vibración, entre las cuales se encuentra observar esta señal en el dominio de la frecuencia, representada mediante una gráfica de amplitud vs frecuencia. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de vibraciones.

El matemático francés Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) fue quien desarrolló una forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas senoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos (A-MAQ S.A., 2005).

Básicamente lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal de vibración, después calcula todas las series de señales senoidales que contiene la señal compuesta y por último las muestra en forma individual en el eje “x” de la frecuencia (A-MAQ S.A., 2005). En la figura 4.8 se muestra un esquema en tres dimensiones donde se representa una señal de vibración compuesta, a ésta señal se le calculan todas las series de señales senoidales en el dominio del tiempo y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia.

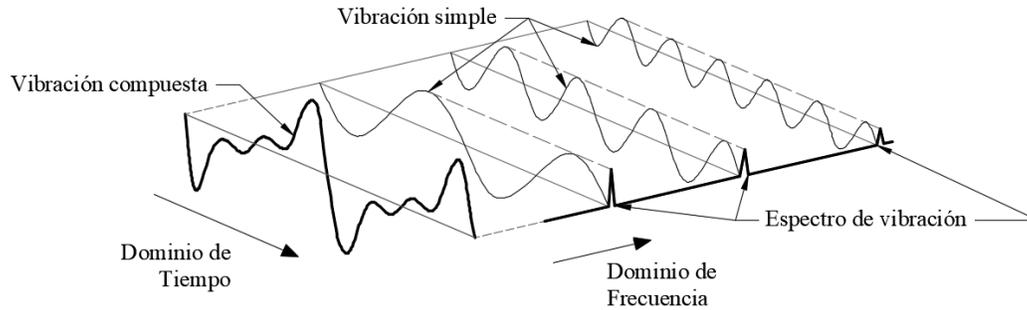


Figura 4.8. Señal de vibración compuesta en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia (modificado de A-MAQ S.A., 2005)

4.4.1 Métodos de análisis espectral

Las técnicas de análisis espectral en el dominio de la frecuencia reciben, en general, el nombre de técnicas de análisis espectral y sus fundamentos básicos pertenecen al denominado análisis de Fourier. Así, dada una serie temporal discreta $n(t)$, utilizando la transformada de Fourier, es posible transferir la información contenida en dicha serie al dominio de las frecuencias, donde, por lo general, suele resultar más efectiva la caracterización estadística del fenómeno aleatorio analizado (Rodríguez, 1995).

La idea básica sobre la que se apoya el análisis espectral puede resumirse brevemente de la siguiente manera. Sea una función $n(t)$ que puede ser expresada como combinación lineal de un conjunto de funciones $\beta_i(t)$. Esto es:

$$n(t) = \sum_i \Gamma_i \beta_i(t) \quad (4.2)$$

Se define entonces un conjunto de cantidades, en términos de Γ , que indique la importancia relativa de cada β_i para generar $n(t)$, mediante una combinación lineal. Es decir, el análisis espectral consiste en descomponer fenómenos, de mayor a menor complejidad, en constituyentes elementales y conocer cuál es la contribución de cada uno de ellos al proceso. De esta forma se puede obtener un mayor conocimiento de la estructura y la evolución temporal (espacial) del sistema, de cuya observación se ha obtenido la muestra $n(t)$.

Las funciones β_i serán del tipo seno y coseno, y los valores de Γ_i vendrán representados por la amplitudes correspondientes a tales funciones.

A continuación se mencionan las cuatro formas de la transformada de Fourier:

- La Serie de Fourier.
- La Transformada integral de Fourier
- La Transformada Discrecional de Fourier.
- La Transformada Rápida de Fourier.

La transformada discreta de Fourier es la herramienta que se utilizara para analizar las vibraciones de la presente tesis.

4.4.2 Transformada Discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier (TDF) es una técnica para el cálculo automático del espectro, opera con una señal de muestras en el dominio del tiempo y a partir de ésta se genera un espectro de muestras en el dominio de la frecuencia (Rodríguez, 1995). La función de densidad espectral es definida como:

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} |X(f)|^2 \quad (4.3)$$

Donde $X(f)$ son los coeficientes complejos de Fourier, puede estimarse directamente a partir de la serie temporal $n(t)$, mediante la transformada de Fourier de ésta, sin necesidad de obtener la función de auto correlación. La transformada de Fourier de una serie temporal discreta puede expresarse como:

$$X(f) = \sum_{-\infty}^{\infty} n(t) e^{-i2\pi f t \Delta t} \quad (4.4)$$

La estimación del espectro así obtenida recibe normalmente el nombre de Periodograma y su estimación se detalla a continuación.

Considerando una serie temporal discreta, constituida por N puntos muestreados en intervalos de tiempo equidistantes Δt :

$$n(t_n) = n_n(n\Delta t) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4.5)$$

Se puede limitar el rango de variación de la sumatoria entre 0 y $N-1$, de forma que para una frecuencia se tendrá:

$$X(f_m) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n(t_n) e^{-i2\pi f_m t_n} \quad (4.6)$$

para

$$m = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad \text{y} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4.7)$$

donde

$$t_n = n\Delta t \text{ y } f_m = m\Delta f \quad (4.8)$$

Donde Δf es la resolución frecuencial obtenida al realizar la transformada de $n(t)$. Es decir, Δf representa la separación entre las frecuencias asociadas a cada dos valores de $X(f_m)$ consecutivos.

Para una serie temporal de duración $T = N\Delta t$, la relación entre la resolución frecuencial y el intervalo de muestreo viene dada por:

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (4.9)$$

De forma que:

$$2\pi f_m t_n = 2\pi m n \Delta f \Delta t = \frac{2\pi m n}{N} \quad (4.10)$$

Por lo que la Transformada Discreta de Fourier para $n(t)$ se podrá escribir como:

$$X(f_m) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n(t_n) e^{-i2\pi m \Delta f n \Delta t} \quad (4.11)$$

O bien:

$$X(f_m) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n(t_n) e^{\left(\frac{-i2\pi m n}{N}\right)} \quad (4.12)$$

donde cada valor de f_m vendrá dado por:

$$f_m = \frac{m}{N\Delta t} \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4.13)$$

Sin embargo, no será necesario realizar el cálculo de los coeficientes complejos de Fourier hasta el punto $N-1$ puesto que, debido a las propiedades matemáticas intrínsecas a la transformada de Fourier, se verifica la siguiente relación de simetría:

$$X(f_m) = X(f_{m-N}) \quad (4.14)$$

Luego, solamente será preciso especificar $X(f_m)$ para los valores de m comprendidos entre 0 y $N/2$.

Además, para un periodo de muestreo Δt , la frecuencia máxima que puede ser resuelta viene dada por la frecuencia de Nyquist, f_N :

$$f_{max} = \frac{1}{2\Delta t} = f_N \quad (4.15)$$

Es decir, el valor máximo que puede tomar m en f_m vendrá determinado por:

$$\frac{m_{max}}{N\Delta t} = \frac{1}{2\Delta t} \leftrightarrow m_{max} = \frac{N}{2} \quad (4.16)$$

En otras palabras, para m igual a $N/2$ se tiene el valor de la frecuencia máxima resoluble f_N :

$$f_{max} = f_{\frac{N}{2}} = \frac{N/2}{N\Delta t} = \frac{1}{2\Delta t} = f_N \quad (4.17)$$

Esto es, el valor máximo de m debe ser, como ya se había apuntado, $N/2$, de forma que con los valores de $X(f)$ asociados a las frecuencias pertenecientes al rango:

$$0 \leq f_m \leq f_N \quad (4.18)$$

Obtendremos toda la información que nuestro intervalo de muestreo nos permite.

Por otra parte, considerando la relación de Euler, el término exponencial de la transformada discreta de Fourier se puede escribir como:

$$e^{(-i2\pi mn/N)} = \cos(2\pi mn/N) - \text{sen}(2\pi mn/N) \quad (4.19)$$

Es decir, los *coeficientes complejos de Fourier* pueden ser descompuestos en una parte real (\Re) y otra imaginaria (\Im), tal como sigue:

$$X(f) = \Re[X(f)] - i\Im[X(f)] \quad (4.20)$$

donde

$$\Re[X(f_m)] = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n_n \cos\left(\frac{2\pi mn}{N}\right) \rightarrow \text{Transformada Coseno} \quad (4.21)$$

$$\Im[X(f_m)] = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n_n \text{sen}\left(\frac{2\pi mn}{N}\right) \rightarrow \text{Transformada Seno} \quad (4.22)$$

es decir:

$$X(f_m) = \left[\Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n_n \cos\left(\frac{2\pi mn}{N}\right) - i \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi mn}{N}\right) \right] \quad (4.23)$$

que escrito en forma más compacta es:

$$X(f_m) = \Re_m - \Im_m \quad (4.24)$$

Entonces, según la definición dada para la función de densidad espectral:

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} |X(f)|^2 \quad (4.25)$$

Y teniendo en cuenta que

$$|X(f_m)|^2 = X(f_m)X(f_m)^* = (\Re_m - i\Im_m)(\Re_m + i\Im_m) = (\Re_m^2 + \Im_m^2) \quad (4.26)$$

Podremos obtener una estimación de la función de densidad espectral, considerando que el registro analizado es de longitud finita, mediante:

$$\hat{S}(f_m) = \frac{2}{T} |X(f_m)|^2 \quad (4.27)$$

Expresando $X(f_m)$ en función de las transformadas seno y coseno y extrayendo como factor común el valor Δt , se tiene:

$$\hat{S}(f_m) = \frac{2}{T} |X(f_m)|^2 = \frac{2(\Delta t)^2}{N\Delta t} (\Re_m^2 + \Im_m^2) = \frac{2\Delta t}{N} (\Re_m^2 + \Im_m^2) \quad (4.28)$$

Para

$$f_m = \frac{m}{N\Delta t} ; m = 0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (4.29)$$

Los términos \Re_m e \Im_m e pueden obtener directamente a partir de sus definiciones, es decir:

$$\Re[X(f_m)] = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n_n \cos\left(\frac{2\pi mn}{N}\right)$$

$$\Im[X(f_m)] = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} n_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi mn}{N}\right)$$

Cabe mencionar que este proceso requiere un tiempo de computación muy elevado, principalmente para valores altos de N . Sin embargo, estas expresiones pueden ser resueltas empleando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, que permite reducir sustancialmente el número de multiplicaciones involucradas en la resolución de las expresiones anteriores, consiguiéndose así una reducción drástica en el tiempo de computación necesario.

El análisis de las propiedades estadísticas de los *coeficientes complejos de Fourier* revela que éstos presentan una elevada varianza respecto a su valor medio. De esta forma, el espectro “crudo” obtenido directamente a partir de los mismos, no puede proporcionar resultados estadísticamente significativos.

La forma más elemental de reducir la variabilidad de las estimaciones espectrales es emplear el operador promedio. Los promedios para suavizar las estimaciones pueden ser:

- Promedio de diferentes estimaciones para la misma frecuencia.
- Promedio de las estimaciones centradas alrededor de una frecuencia dada.

Para obtener varias estimaciones espectrales para la misma frecuencia, a partir de una serie temporal discreta, se debe subdividir la secuencia de observaciones en segmentos de menor tamaño. Automáticamente, esto da lugar a una disminución en la resolución final. Los promedios de diferentes estimaciones para la misma frecuencia corresponden al denominado método de Bartlett (Bartlett, 1948). Este método fue modificado posteriormente por Welch (Welch, 1967), del cual se hará uso para la presente tesis, dado que la eficiencia computacional del algoritmo FFT (transformada rápida de Fourier), ha permitido que el método de Welch se haya convertido en el procedimiento de estimación espectral más frecuente usado en la actualidad (Rodríguez, 1995).

4.4.3 Método de Welch

El método Welch puede ser descrito tal como sigue. Sea un registro de N datos, $n(t)$:

$$\{n(0), n(1), \dots, n(N - 1)\} \quad (4.30)$$

Al dividir $n(t)$ en K segmento, de M datos cada uno, sobrepuesto en una cantidad ($S = M - D$), donde D representa el desplazamiento entre segmentos adyacentes, el comienzo de la segunda secuencia se localiza en la ordenada D , la tercera secuencia en $2D$ y así sucesivamente, hasta alcanzar la posición $N - M - 1$, origen de la última secuencia a analizar. De esta forma, los K segmentos pueden expresarse como:

$$\begin{aligned}
 n_0(t) &= n_0, n_1, \dots, n_{(M-1)} \\
 n_1(t) &= n_D, n_{D+1}, \dots, n_{D+(M-1)} \\
 n_2(t) &= n_{2D}, n_{2D+1}, \dots, n_{2D+(M-1)} \\
 n_0(t) &= n_0, n_1, \dots, n_{(M-1)} \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 n_{(K-1)}(t) &= n_{(K-1)D}, n_{(K-1)D+1}, \dots, n_{(K-1)D+(M-1)}
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

O bien, en forma compacta

$$n_j(I) = n(I + JD) \tag{4.32}$$

donde

$$\begin{aligned}
 I &= 0, 1, 2, \dots, M - 1 \\
 J &= 0, 1, 2, \dots, K - 1
 \end{aligned}
 \tag{4.33}$$

Siendo JD el origen de la J-ésima secuencia. Es decir, la diferencia entre el número de datos por segmento y el de los datos sobrepuestos:

$$JD = J(M - S) \tag{4.34}$$

Para un M y un S dados, el número de sub-series que se obtiene, a partir de un registro de N datos, viene dado por la parte entera de:

$$K = INT \left[\frac{N - S}{M - S} \right] \tag{4.35}$$

O teniendo en cuenta que la cantidad de desplazamiento D es:

$$(D = M - S) \rightarrow K = INT \left[\frac{N - M + D}{D} \right] \tag{4.36}$$

La expresión de los diferentes segmentos ponderados mediante la ventana de datos será:

$$n_j(I) = w(I) * n(I + JD) \tag{4.37}$$

Y el espectro correspondiente a cada uno de ellos:

$$\hat{S}_j(f) = \frac{2}{uM\Delta t} |X_j(f)|^2 ; 0 \leq f \leq \frac{1}{2\Delta t} \tag{4.38}$$

donde $X_J(f)$ es la transformada discreta de Fourier del segmento J-ésimo:

$$X_J(f) = \Delta t \sum_{I=0}^{M-1} w(I)n_J(I)e^{-i2\pi fI\Delta t} \quad (4.39)$$

Y u es un factor de corrección, introducido para evitar la reducción de energía (varianza) en la sub-serie al aplicarle la ventana de datos:

$$u = \frac{1}{M} \sum_{I=0}^{M-1} (w(I))^2 \quad (4.40)$$

Una vez calculados los periodogramas correspondientes a cada una de las K sub-series, se realiza el promedio de éstos, obteniéndose el estimador espectral de Welch:

$$\bar{S}^{(w)}(f) = \frac{1}{K} \sum_{J=0}^{K-1} \hat{S}_J(f) \quad (4.41)$$

Dentro de un análisis computacional de las señales de vibración registradas por medio del método de Welch y por practicidad, se utiliza generalmente la herramienta MATLAB la cual incluye, dentro de su sistema, comandos programados para realizar dicho análisis. Para el método de Welch, MATLAB utiliza un comando llamado “pwelch” el cual analiza la señal de vibración en el dominio del tiempo y la transforma al dominio de la frecuencia.

4.5 Ruido y filtro en señales digitales

4.5.1 Ruido en señales digitales

Una señal digital por lo general va acompañada de ruido, es decir, de un conjunto de datos o información general que no es de interés o es irrelevante, degrada o distorsiona la señal, y/o impide o limita el estudio o uso de la información. El ruido puede existir antes, después o incluso radicar en el *sensor*, *transductor* o actuador con los que interacciona la señal, o bien se encuentra en el medio que la genera. Puede haber ruido en la representación de una señal, en su codificación, en el método de análisis y hasta en su interpretación, modelado, entre otros. Incluso ciertos métodos de procesamiento y análisis pueden introducir ruido, perturbación o modificación colateral (Márquez, 2014).

El ruido no solo incluye fluctuaciones desde muy suaves (bajas frecuencias) hasta muy abruptas (altas frecuencias), sino que también comprende señales coherentes y limpias, pero

cuya información no es relevante al estudio, es externa a los datos de interés y debe ser separada o *filtrada*.

Cabe mencionar que rara vez se puede separar o eliminar totalmente el ruido de una señal, sino que se atenúa o reduce.

4.5.2 Filtro en señales digitales

Un filtro digital, es un filtro que opera sobre señales digitales. Es una operación matemática que toma una secuencia de números (señal de entrada) y la modifica a otra secuencia de números (señal de salida) con el objetivo de resaltar o atenuar ciertas características.

Los filtros son diseñados para dejar pasar o amplificar las señales de entrada de ciertas frecuencias y bloquear o atenuar todas aquellas frecuencias que no se encuentran dentro de ese rango. Si la magnitud de la señal de entrada se mantiene constante y la frecuencia es variada, la magnitud y/o la fase de la señal de salida serán constante sobre algún rango de frecuencia y varía fuera de este rango (Quiroz, 2007). En la figura 4.9 se puede observar una señal digital “cruda” y al mismo tiempo esa señal filtrada.

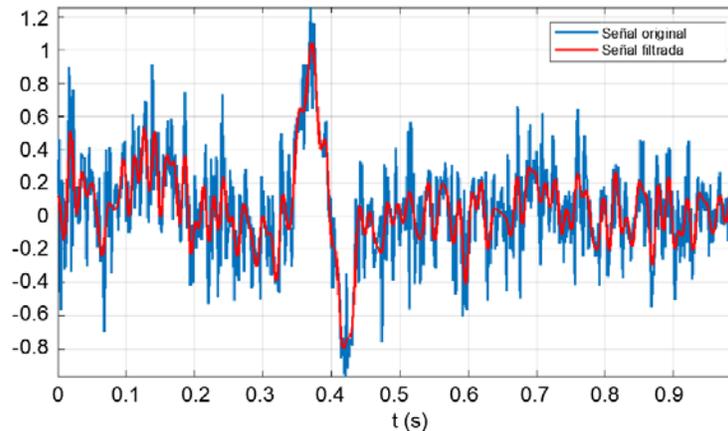


Figura 4.9. Señal digital original-azul comparada con la misma señal filtrada-roja (modificado de Gómez, 2017)

Básicamente lo que realiza un filtro es mejorar la señal digital y en algunos casos restaurarla. Existen diferentes tipos de filtros, cada filtro tiene una respuesta específica que depende de su aplicación: filtro pasa-bajas, pasa-banda, pasa-altas, y rechaza-banda. Sus nombres describen el comportamiento del filtro. En la figura 4.10 se muestra un esquema de la función básica de cada filtro y donde ω_n es la frecuencia de corte.

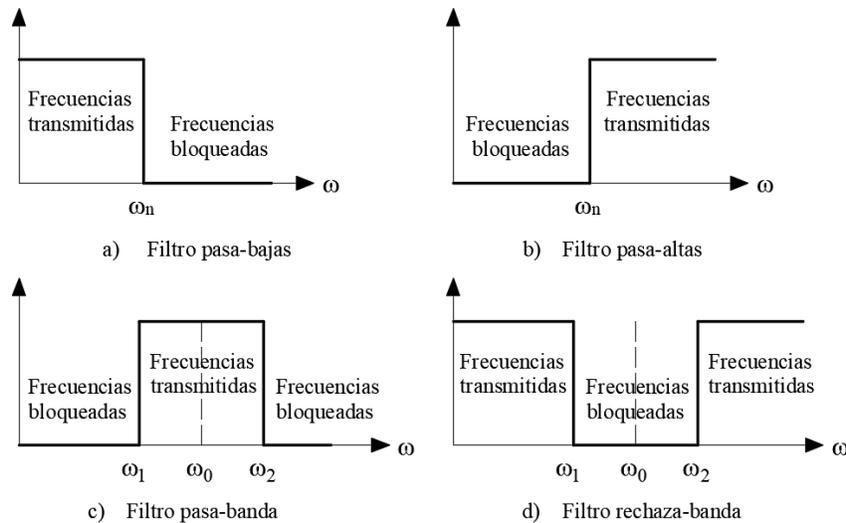


Figura 4.10. Esquema del funcionamiento básico y general de cada filtro (modificado de Quiroz, 2007)

Para obtener los desplazamientos de los datos de las vibraciones previamente analizados se necesita conocer propiedades de la estructura sometida a dichas vibraciones, ya que ésta reacciona de una forma específica, la cual depende de los materiales con el que está constituida y de su geometría. Para ello se necesita realizar una *prueba de vibración libre* o prueba de impacto.

4.6 Prueba de vibración libre

Las pruebas de vibración libre o prueba de impacto permite conocer el comportamiento natural de una estructura que es sometida a una fuerza, esto a través de vibraciones y su posterior análisis. De esta prueba se pueden determinar, además de la frecuencia natural de vibración que tiene un cuerpo mediante un análisis espectral de potencia, parámetros que definen el comportamiento estructural de ese cuerpo, como son (Chopra, 2014):

- Período de vibración, T_n : Este parámetro proporciona información del tiempo que tarda una oscilación completa en un sistema vibratorio, es decir, el tiempo que invierte una onda en completar un ciclo. Esta variable está definida por la siguiente ecuación:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (4.42)$$

donde ω_n es la frecuencia natural de vibración.

- Fracción de amortiguamiento, ζ : Es una propiedad del sistema que mide la energía disipada en un ciclo de vibración libre o en un ciclo de vibración forzada armónica, la cual depende de su masa y rigidez, la siguiente ecuación describe este parámetro:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (4.43)$$

donde c es la constante de amortiguamiento, m es la masa y ω_n la frecuencia natural de vibración.

Debido a que no es posible determinar de manera analítica la fracción de amortiguamiento (ζ) para las estructuras prácticas, esta propiedad debe determinarse de forma experimental (Chopra, 2014). Esta prueba consiste en aplicar una fuerza a una estructura, medir la respuesta mediante sensores. Los experimentos de vibración libre proporcionan un medio para determinar el periodo de vibración natural y la fracción de amortiguamiento. Para los sistemas ligeramente amortiguados, la fracción de amortiguamiento puede determinarse a partir de:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad \text{ó} \quad \zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}} \quad (4.44)$$

donde \ddot{u}_i es la aceleración máxima, \ddot{u}_{i+j} es la aceleración mínima registrada y j es el número de oscilaciones entre \ddot{u}_i y \ddot{u}_{i+j} . Esto puede apreciarse en la figura 4.11, en este caso, j equivale a 10 oscilaciones.

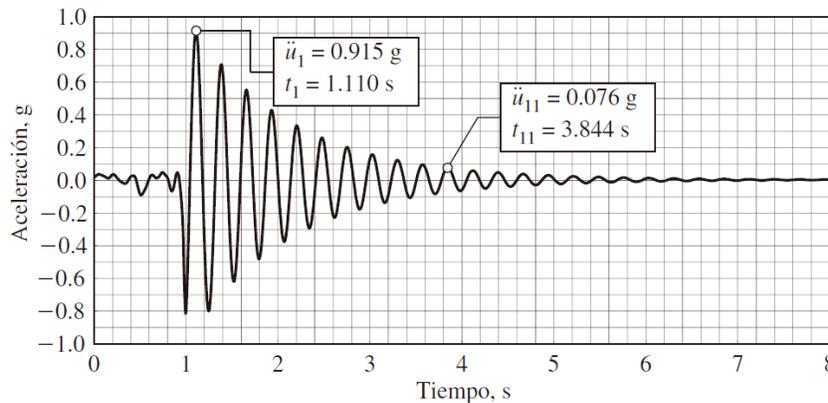


Figura 4.11. Registro de vibración libre de un modelo de plexiglás (Chopra, 2014)

Para el período de vibración natural, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$T_n = \frac{t_{i+j} - t_i}{j} \quad (4.45)$$

donde t_i es el tiempo inicial, t_{i+j} es el tiempo final y j es el número de oscilaciones entre \ddot{u}_i y \ddot{u}_{i+j} o entre t_i y t_{i+j} .

A partir del periodo de vibración y la fracción de amortiguamiento, se pueden conocer otros factores que se requieren para el análisis de desplazamiento mediante métodos de diferencias finitas (Chopra, 2014):

- Frecuencia natural de vibración, ω_n : También llamada frecuencia de resonancia, es la frecuencia a la cual la rigidez y las fuerzas de inercia se anulan entre sí, también llamada frecuencia de resonancia y se expresa con la siguiente ecuación:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} \quad (4.46)$$

donde T_n es el periodo de vibración natural.

- Constante de amortiguamiento, c : Es una medida de la energía disipada en un ciclo de vibración libre o en un ciclo de vibración forzada armónica, y se expresa con la siguiente ecuación:

$$c = 2m\zeta\omega_n \quad (4.47)$$

donde m es la masa, ζ es la fracción de amortiguamiento y ω_n la frecuencia de natural vibración.

- Rigidez, k : Es la propiedad que tiene un elemento estructural para oponerse a las deformaciones, es decir, la capacidad de soportar cargas sin deformarse o desplazarse excesivamente, y se expresa con la siguiente ecuación:

$$k = m\omega_n^2 \quad (4.48)$$

donde m es la masa y ω_n la frecuencia natural de vibración.

Estos parámetros son esenciales al momento de someter a una estructura a vibración, dado que, dependiendo de las características del material, esta tiende a reaccionar de una forma muy particular. Dicha reacción se verá reflejada directamente al desplazamiento que sufra cualquier estructura, por ello es indispensable obtenerlos.

4.7 Transductores de vibración

El transductor de vibraciones es un aparato que produce una señal eléctrica que es una réplica del movimiento vibratorio al cual está sujeto. Es el dispositivo que captura las vibraciones y las transmite por medio de señales de vibración. Un transductor no debe agregar falsos componentes a la señal, y debería producir señales uniformes en todo el rango de frecuencias que nos interesa (White G., 2010).

Los tipos de transductores responden a diferentes parámetros de la fuente de vibración, como se describe a continuación:

- Sensor de proximidad. Sensible a desplazamiento.
- Sensor de velocidad. Sensible a velocidad.
- Acelerómetro. Sensible a aceleración.

Se puede considerar al *acelerómetro piezoeléctrico* como el transductor estándar para la medición de vibración. Este tipo de transductor es un sensor electromecánico que genera una tensión eléctrica cuando es sometido a la vibración. Esto se logra a través de un cristal, que al ser sometido a esfuerzos, genera una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada. La masa sísmica está sujeta a la base de un perno axial, que se apoya en un resorte circular y el

elemento piezoeléctrico o elemento de cristal esta sujetado entre la base y la masa como se muestra en la figura 4.12.

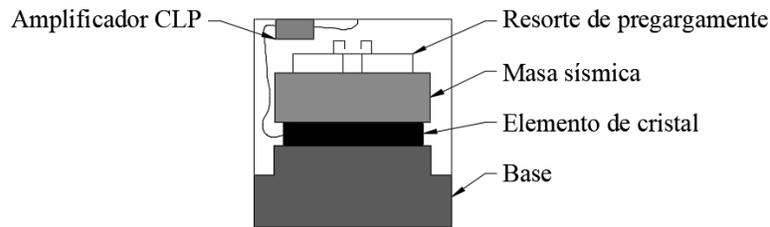


Figura 4.12. Esquema general de un acelerómetro piezoeléctrico (modificado de White G., 2010)

Cuando se mueve el acelerómetro en la dirección arriba-abajo, la fuerza que se requiere para mover la masa sísmica esta soportada por el elemento activo de cristal. Según la segunda ley de Newton, esa fuerza es proporcional a la aceleración de la masa. La fuerza sobre el cristal produce la señal de salida que a su vez es proporcional a la aceleración del transductor o sensor. Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, es decir, que tiene un rango dinámico muy largo (White G., 2010).

Para la presente tesis, se utilizó un par de acelerómetros piezoeléctricos con la capacidad de medir vibraciones en tres direcciones, axial (x), tangencial (y) y radial (z), es decir, un acelerómetro triaxial a 3 canales (White G., 2010).

4.8 Desplazamiento

Si una partícula se mueve en relación a un punto de referencia, entonces la posición de la partícula cambia. A este cambio en la posición se le conoce como desplazamiento. La palabra desplazamiento implica que una partícula se movió, se desplazó. El desplazamiento es un vector, esto significa que tiene tanto una dirección como una magnitud y se representa de manera visual como una flecha que apunta de la posición inicial a la posición final (Vaccaro y Ocón, 2007).

Dentro de los estudios relacionados con desplazamientos de estructuras hidráulicas obtenidos mediante vibración, éstos suelen ser relativamente pequeños, por esa razón se ha adoptado el micrómetro (μ) como unidad de medida.

4.8.1 Determinación de desplazamientos

Se ha mencionado que el objetivo principal de medir las vibraciones es obtener los desplazamientos a través de éstas, para dicho fin se utilizaran herramientas del análisis estructural, ya que el desfogue de fondo es una estructura hidráulica y tiene un comportamiento particular.

Para determinar el desplazamiento que sufre una estructura por medio de la medición de vibraciones producidas por alguna fuerza se necesita realizar una *evaluación numérica de la*

respuesta dinámica, la cual se describe en el libro *Dinámica de Estructuras* (Chopra, 2014). Por lo general, la solución analítica de la ecuación de movimiento para un sistema de un solo grado de libertad no es posible si la excitación varía arbitrariamente con el tiempo (señal estacionaria aleatoria). Tales problemas pueden abordarse mediante métodos numéricos paso a paso en el tiempo para la integración de ecuaciones diferenciales. Entre los métodos más utilizados se tienen los siguientes:

- Método paso a paso en el tiempo
- Métodos basado en la interpolación de la excitación
- Método de la diferencia central
- Método de Newmark
- Estabilidad y error de cálculo

En este caso se hará uso del método de diferencia central que se describe a continuación.

4.8.2 Método de la diferencia central

Este método se basa en una aproximación por diferencias finita de las derivadas temporales del desplazamiento (es decir, la velocidad y la aceleración). Si se toman pasos de tiempo constantes, $\Delta t_i = \Delta t$, las expresiones de diferencias centrales para la velocidad y la aceleración en el tiempo i son:

$$\dot{u}_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad \ddot{u}_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad (4.49)$$

Al sustituir estas expresiones aproximadas para la velocidad y la aceleración en la ecuación (4.43), especificada para sistemas elásticos lineales, resulta:

$$m \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} + c \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} + ku_i = p_i \quad (4.50)$$

En esta ecuación, u_i y u_{i-1} ya se conocen (a partir de la aplicación del procedimiento de los pasos de tiempo anteriores). La transferencia de estas cantidades conocidas al lado derecho conduce a:

$$\left[\frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i+1} = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad (4.51)$$

o

$$\hat{k}u_{i+1} = \hat{p}_i \quad (4.52)$$

donde

$$\hat{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \quad (4.53)$$

y

$$\hat{p}_i = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad (4.54)$$

A continuación se presenta el procedimiento del método de diferencia central:

1.0 Cálculos iniciales

$$\begin{aligned} 1.1 \quad \ddot{u}_0 &= \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m} \\ 1.2 \quad u_{-1} &= u_0\Delta t\dot{u}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{u}_0 \\ 1.3 \quad \hat{k} &= \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \\ 1.4 \quad a &= \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \\ 1.5 \quad b &= k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \end{aligned}$$

2.0 Cálculos para el tiempo de paso i

$$\begin{aligned} 2.1 \quad \hat{p}_i &= p_i - au_{i-1} - bu_i \\ 2.2 \quad u_{i+1} &= \frac{\hat{p}_i}{\hat{k}} \end{aligned}$$

3.0 Repetición para el próximo paso de tiempo

Reemplace i por $i + 1$ y repita los pasos 2.1, 2.2 y 2.3 para el siguiente paso de tiempo.

Entonces, la incógnita u_{i+1} está dada por:

$$u_{i+1} = \frac{\hat{p}_i}{\hat{k}} \quad (4.55)$$

La solución u_{i+1} en el tiempo $i + 1$ se determina a partir de la condición de equilibrio, ecuación (4.55), con el tiempo i sin usar la condición de equilibrio, ecuación (4.56), en el tiempo $i + 1$. Estos métodos se denominan *métodos explícitos*.

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + (f_s)_i = p_i \quad (4.56)$$

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + (f_s)_{i+1} = p_{i+1} \quad (4.57)$$

Obsérvese que en la ecuación (4.53) se usan los desplazamientos conocidos u_i y u_{i-1} para calcular u_{i+1} . Por lo tanto, se requieren u_0 y u_{-1} para determinar u_1 ; el desplazamiento inicial u_0 especificado ya se conoce. En la determinación de u_{-1} se especifica la ecuación (4.1) para $i=0$, a fin de obtener:

$$\dot{u}_0 = \frac{u_1 - u_{-1}}{2\Delta t} \quad \ddot{u}_0 = \frac{u_1 - 2u_0 + u_{-1}}{(\Delta t)^2} \quad (4.58)$$

Si se despeja u_{-1} de la primera ecuación y se sustituye en la segunda, resulta:

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t(\dot{u}_0) + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_0 \quad (4.59)$$

El desplazamiento inicial u_0 y la velocidad inicial \dot{u}_0 están dados y la ecuación de movimiento en el tiempo 0 ($t_0 = 0$),

$$m\ddot{u}_0 + c\dot{u}_0 + ku_0 = p_0 \quad (4.60)$$

Proporciona la aceleración en el tiempo 0:

$$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m} \quad (4.61)$$

En el procedimiento del método de diferencia central se resume el procedimiento antes descrito, tal y como podría implementarse en una computadora.

El método de la diferencia central podría “fallar”, dando resultados sin sentido, debido al redondeo numérico si el paso de tiempo elegido no es lo suficiente corto. El requisito específico para su estabilidad es (Chopra, 2014):

$$\frac{\Delta t}{T_n} < \frac{1}{\pi} \quad (4.62)$$

Esto nunca es una limitación para los sistemas de un grado de libertad debido a que es necesario elegir un paso de tiempo mucho más pequeño si se desea obtener resultados exactos. Por lo regular, para definir la respuesta adecuadamente, en la mayoría de los análisis de respuesta ante sismos se elige un paso de tiempo aún más corto (generalmente) para definir la aceleración del terreno con precisión.

Finalmente, el cálculo de los desplazamientos producidos por vibración sigue un proceso definido, el cual se resume a continuación:

- Prueba de impacto.
- Calibración de sensores

- Medición de vibraciones.
- Ajuste y filtrado de las señales.
- Obtención de parámetros geométricos y del material sometido a vibración.
- Cálculo de los desplazamientos mediante un análisis estructural.

5 Desarrollo de la investigación

5.1 Dispositivo experimental

Para estudiar las vibraciones que se producen en un túnel de desfogue de una presa, se simuló dicha estructura (sin escala) con un dispositivo experimental ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual se describe a continuación.

Este dispositivo se compone de un tanque de carga constante de 2.0 m x 1.0 m en la base y una altura de 1.30 m, desde el cual una bomba centrífuga de 20 hp succiona agua para conducirla a través de una tubería de PVC blanco con diámetro interior $D = 15.24$ cm ($D = 6$ pulgadas) y de longitud $L = 9.35$ m, al final de ésta se ubica una válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro que sirve, adicional al equipo de bombeo, para regular el caudal. A continuación, se presenta un codo de 90° y de $D = 15.24$ cm para cambio de dirección, que a su vez, se conecta con una ampliación de PVC blanco que aumenta de $D = 15.24$ cm ($D = 6$ pulgadas) a $D = 20.32$ cm ($D = 8$ pulgadas). En seguida se presenta otro codo de 90° de $D = 20.32$ cm ($D = 8$ pulgadas) y a partir de esta pieza se inicia el regreso del agua hacia el tanque. El dispositivo continua con un tramo de tubería de PVC blanco para concentrarse, por medio de bridas, a la tubería de PVC transparente de $D = 20.32$ cm ($D = 8$ pulgadas) y $L = 8.30$ m. Entre los dos primeros tramos de esta tubería (tramo de mediciones) se colocaron las compuertas de tipo circular para las mediciones de vibración. Inmediatamente aguas abajo de las compuertas se colocó en la parte superior de la brida un venteo o dispositivo aireador vertical de PVC blanco de 2.54 cm ($D = 1$ pulgada) de diámetro y 35 cm de longitud. Finalmente se tiene una válvula de mariposa de $D = 20.32$ cm ($D = 8$ pulgadas), la cual ayuda a generar el salto hidráulico cuando las pruebas así lo requieran, y ésta descarga libremente hacia el tanque de carga constante. En la figura 5.1 se muestra un esquema del dispositivo experimental.

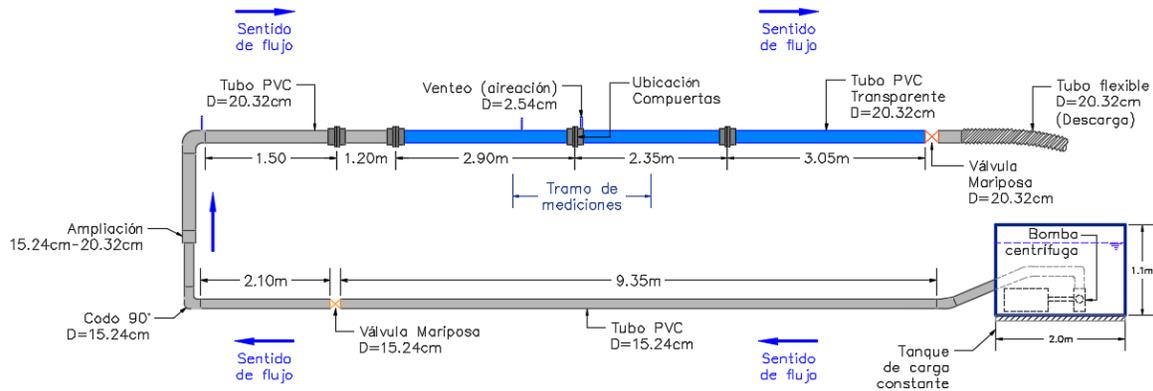


Figura 5.1. Esquema general del dispositivo experimental, Instituto de Ingeniería, UNAM

El sistema hidráulico, como se dijo, es alimentado por medio de una bomba centrífuga la cual es controlada con un variador de velocidad de giro, con este dispositivo y con ayuda de las válvulas de mariposa (principalmente la de $D = 15.24$ cm) se puede regular el gasto que circula a través de la tubería. En la figura 5.2 se muestra una fotografía del variador de velocidad.



Figura 5.2. Variador de velocidad de la bomba

5.2 Dispositivos de medición

5.2.1 Compuertas

Para medir las vibraciones, primeramente se colocaron compuertas del tipo circular del 10, 20, 30, 40, 50 y 60% de apertura, simulando precisamente una válvula de compuerta con una operación controlada a esos porcentajes. Estas compuertas están hechas de acrílico con un espesor de $\frac{1}{2}$ pulgada, las cuales se instalan entre dos bridas de 20.32 cm de diámetro (8 pulgadas). A partir de dichas compuertas y con el variador de velocidad y ayuda de la válvula

de mariposa de $D = 15.24$ cm se controló el gasto. En la figura 5.3 se muestra el esquema de cada compuerta utilizada, mostrando en ellas el porcentaje de apertura (área hidráulica) y el tirante correspondiente a dicha apertura.

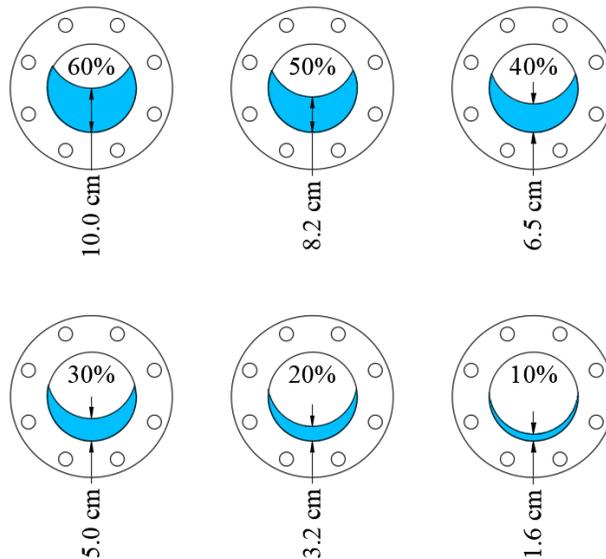


Figura 5.3. Esquema de compuertas circulares parcialmente abiertas

5.2.2 Medición de gasto

Para medir el gasto, que fue una variante importante en esta investigación, se realizó utilizando un medidor ultrasónico de flujo (PrimeFlo-T) el cual se instaló a 3.40 m de la bomba centrífuga en la tubería inicial de PVC de 15.24 cm de diámetro. En la figura 5.4 se muestra una fotografía de este dispositivo y sus sensores de flujo.



Figura 5.4. Medidor de flujo ultrasónico PrimeFlo-T

5.2.3 Medición de velocidad en el dispositivo aireador (venteo)

Las condiciones a las que opera un estrangulamiento provocado por un cierre parcial de compuerta implican un aumento de velocidad de flujo y una disminución de presión, siendo éste último factor el causante principal del fenómeno de la cavitación. Para evitar esta situación, se tiene instalado un venteo de 2.54 cm de diámetro aguas abajo de la compuerta (directamente en la brida), de esta manera se permite la entrada de aire, reduciendo así la probabilidad de cavitación.

La medición de velocidad se realizó con un anemómetro “Testo 435”. Con este parámetro y el diámetro del venteo se pudo obtener la demanda o gasto de aire en m^3/s que requiere el sistema. La figura 5.5 muestra una foto del anemómetro.



Figura 5.5. Anemómetro testo 435

5.2.4 Medición de presión en el dispositivo aireador (venteo)

Cuando un dispositivo aireador requiere o demanda cierta cantidad de aire significa que la presión dentro de la tubería está disminuyendo. Esta presión suele estar por debajo de la presión atmosférica, sub-presión. Para medir las sub-presiones que se presentaron en el venteo (aguas abajo de la compuerta) se utilizó un dispositivo con sensores de presión que se conectan, en este caso, en la base del venteo. Un programa de adquisición de datos permite registrar los datos en el disco duro de una computadora.

5.2.5 Acelerómetros o sensores

Las vibraciones que se producen en el sistema para las diferentes compuertas y los diferentes gastos se midieron utilizando un par de sensores inalámbricos (acelerómetro triaxial a tres canales) identificados como *sensor 405* (medición aguas abajo) y *sensor 407* (medición aguas

arriba), y una base receptora “LORD MicroStrain”. En la tabla 5.1 se muestran las especificaciones técnicas de los acelerómetros o sensores.

Especificaciones	
General	
Sensore integrados	Acelerómetro MEMS triaxial, 3 canales Temperatura interna, 1 canal
Capacidad de almacenamiento de datos	2 Mbytes (hasta 1.000.000 de puntos de datos)
Canales de acelerómetro	
Rango de medición	$\pm 2 g$ $\pm 10 g$ estándar
Ancho de banda de acelerómetro	0 a 500 Hz
Exactitud	10 mg
Resolución	12 bit
Canal de temperatura integrado	
Rango de medición	-40°C a 70°C
Presición y resolución	$\pm 2^\circ C$ (a 25 °C) típico, 12 bits
Muestreo	
Modos de muestreo	Sincronizado, ciclo de trabajo bajo, registro de datos
Tasas de muestreo	Muestreo continuo: 1 muestra / hora a 512 Hz Muestreo de ráfagas periódicas: 32 Hz a 4096 Hz Registro de datos: 32 Hz a 4096 Hz
Estabilidad de la frecuencia de muestreo	± 3 ppm
Sincronización entre nodos	$\pm 32 \mu\text{seg}$

Tabla 5.1. Especificaciones técnicas de los sensores LORD MicroStrain

Para mostrar gráficamente esas vibraciones “crudas” se utilizó el programa de adquisición de datos “NodeCommander”. Los sensores se sujetan al tubo mediante un par de abrazaderas ajustables. En la figura 5.6 se muestran los sensores inalámbricos y la base receptora y en la figura 5.7 la interfaz del programa de adquisición de datos, en la cual se muestran 3 lecturas: verde-canal 1-axial-x, rojo-canal 2-tangencial-y y azul-canal 3-radial-z.



Figura 5.6. Sensores inalámbricos y base receptora

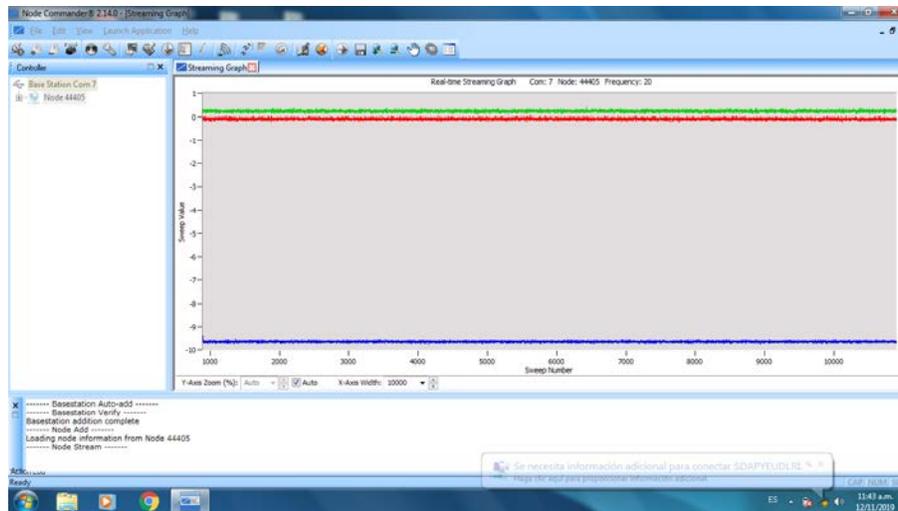


Figura 5.7. Interfaz del programa de adquisición de datos NodeCommander

5.3 Prueba de vibración libre en el dispositivo

5.3.1 Fijación de la tubería

Los desfuegos de fondo de una presa están confinados, es decir, están rodeados de material que los fijan o sujetan, ya sea por la propia cortina o por el medio en el que se asientan o construyen, por ejemplo material pétreo o manto rocoso. Para simular ese confinamiento, el dispositivo en el tramo de interés (tubería de PVC transparente $D = 20.32$ cm) se fijó a la base de metal que lo soporta con ayuda de cintas de tensión o “correas con malacate” las cuales se muestran en la figura 5.8.



Figura 5.8. Sujeción del conducto de PVC transparente a la plataforma de apoyo con cintas de tensión

Una vez que el dispositivo estuvo fijado con las cintas, se procedió a realizar las mediciones, como fue la prueba de impacto para calibrar los sensores, determinar parámetros estructurales de la tubería de estudio e iniciar las mediciones de vibración.

5.3.2 Calibración de los sensores

Para iniciar las mediciones en el dispositivo se requiere que los sensores estén calibrados al doble de la frecuencia natural del tubo, es decir, si el tubo tiene una frecuencia natural de 128 Hz, los sensores deben calibrarse a una frecuencia de 256 Hz, ya que el análisis espectral, por su estructura de programación, divide la frecuencia de muestreo en dos partes. Si la calibración de los sensores no se llevara a cabo de esta manera, la información de cada muestra de vibración quedaría incompleta o escasa para un *análisis espectral de potencia*.

Para obtener la frecuencia natural de vibración del dispositivo, particularmente en el tramo de interés, que es la tubería de PVC transparente, se utilizó la *prueba de vibración libre o prueba de impacto*. En este caso y una vez fijado o “confinado” el tramo de tubería, se colocaron los sensores en el tramo de estudio, calibrados inicialmente a 512 Hz, teniendo como antecedente las frecuencias de vibración naturales de la tubería (figura 4.3) presentadas por Seguel (2014), las cuales rondan los 250 Hz. Se aplicaron 6 golpes distribuidos a lo largo de la tubería, dejando caer sobre ésta un mazo de goma de 200 gr a una altura de 50 cm, provocando así un golpe con 2 N de fuerza. Dicha tubería se dividió en 6 tramos debido a la posición de las cintas de tensión. En la figura 5.9 se muestra un esquema de la distribución de los golpes y la ubicación de las cintas de tensión, así como la posición de los sensores para capturar su vibración.

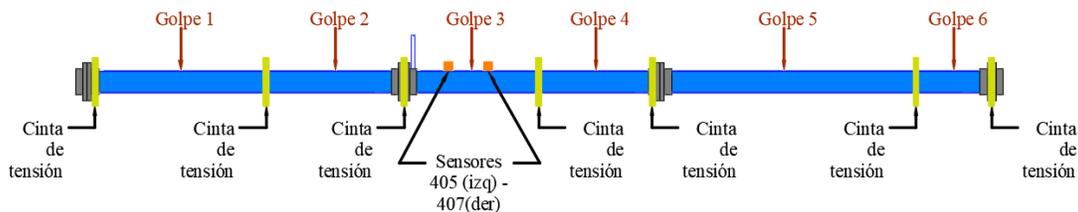


Figura 5.9. Esquema de la posición de las cintas de tensión y la ubicación de los 6 golpes

La información de cada golpe fue registrada por los dos sensores con el fin de comparar la información que captan entre sí. Posteriormente se procesó la información mediante un análisis espectral de potencia utilizando el programa MATLAB y el método de Welch, y se determinó que el golpe 1 obtuvo mayor frecuencia. En la figura 5.10 se muestra la información de este golpe y en el anexo A.1 se presenta la información analizada de cada golpe en forma gráfica.

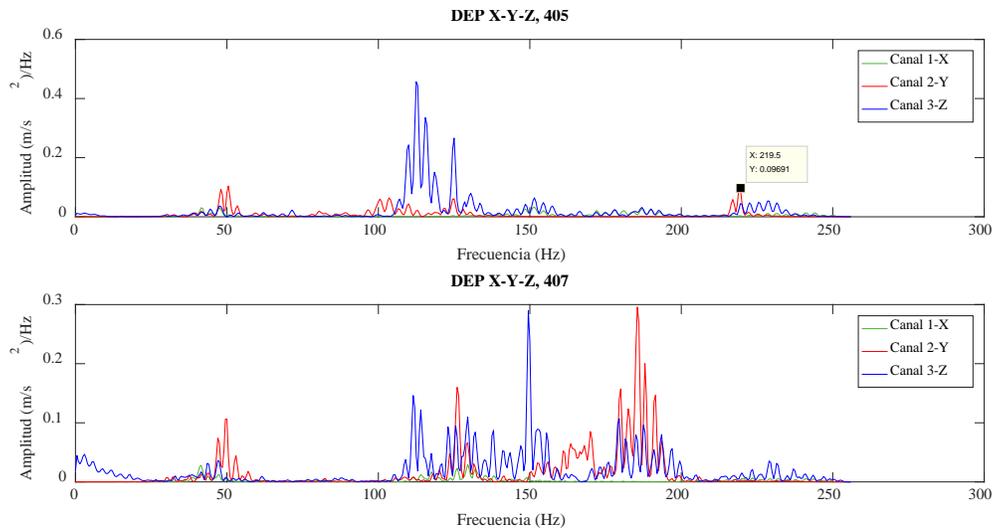


Figura 5.10. Densidad Espectral de Potencia, golpe 1

Con la información y el procesamiento anterior, se demuestra que la tubería de estudio presenta una vibración natural máxima de 219 Hz, el cual se redondea a 256 Hz, que es la frecuencia más utilizada en los acelerómetros. A partir de este dato los sensores se calibraron al doble de esa frecuencia, que en este caso se mantuvo a **512 Hz**, siendo ésta última la frecuencia de muestreo para las mediciones posteriores.

5.3.3 Obtención de parámetros estructurales de la tubería

A partir de la prueba de vibración libre descrita anteriormente, se pueden obtener parámetros estructurales que componen a la tubería, como se menciona en el apartado 4.6. En la figura 5.11 se muestra el golpe 4 “crudo”, es decir, sin realizar un análisis espectral y del cual se extrae información para conocer el comportamiento estructural de la tubería en cuestión.

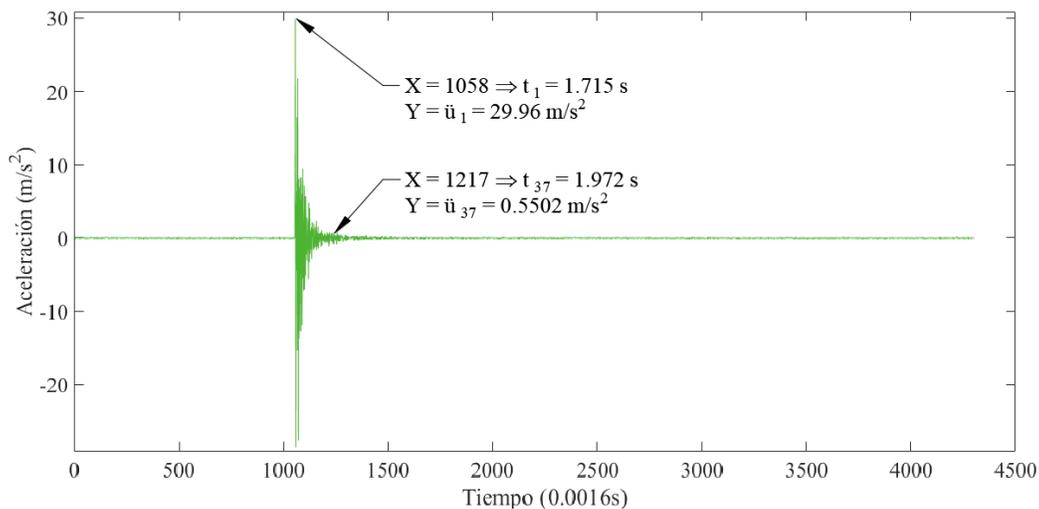


Figura 5.11. Gráfica de la señal de repuesta del golpe 4, sensor 407, canal 1-X

Se realizaron 6 golpes, los cuales fueron registrados por los tres canales de los dos sensores, es decir, se obtuvieron 36 muestras de vibración libre en total para esta prueba. La información se realizó mediante una hoja de cálculo, teniendo como resultados el periodo de vibración (T_n) y la fracción de amortiguamiento (ζ) que posee la tubería. En la tabla 5.2 se muestra la información procesada del golpe 4, utilizando los 2 sensores y 3 canales para cada uno y se marca en color azul los datos extraídos de la figura 5.11.

Golpe	Sensor	Canal	Pico No.	X	Ti (s)	Pico, $\ddot{U}_i(m/s^2)$	T_n	ζ	$\zeta \%$			
4	405	C1 (X)	1	1193	1.934	33.53	0.0077	0.0159	1.5901			
			38	1369	2.219	0.8318						
		C2 (Y)	1	1218	1.974	25.87				0.0084	0.0148	1.4795
			40	1420	2.301	0.6892						
		C3 (Z)	1	1221	1.979	40.44				0.0085	0.0156	1.5552
			44	1446	2.344	0.6053						
	407	C1 (X)	1	1058	1.715	29.96	0.0072	0.0177	1.7672			
			37	1217	1.972	0.5502						
		C2 (Y)	1	1084	1.757	32.3				0.0072	0.0136	1.3611
			46	1285	2.083	0.6884						
		C3 (Z)	1	1083	1.755	41.83				0.0084	0.0152	1.5164
			42	1296	2.100	0.8413						

Tabla 5.2. Cálculo del periodo de vibración y la fracción de amortiguamiento, golpe 4

Como se aprecia en la tabla 5.2, se tiene un periodo de vibración y una fracción de amortiguamiento para cada canal de ambos sensores, por lo que se realizó un promedio de los 6 golpes. Este promedio ayuda a visualizar la similitud que hay entre los resultados de cada golpe y el mismo promedio, teniendo así, confianza en dichos resultados. En la tabla 5.3 se muestra el promedio de dicho análisis.

T_n	ζ	$\zeta \%$
0.008	0.016	1.6

Tabla 5.3. Promedio del periodo de vibración y la fracción de amortiguamiento de la tubería de estudio

Con los datos de la tabla 5.3, los cuales representan únicamente las características del material, se procede a obtener otros parámetros que dependen del material y de la geometría de la tubería, y son necesarios para el cálculo de los desplazamientos. Cabe mencionar que las mediciones se generan aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, y las características entre los tramos de la tubería (particularmente en este dispositivo de estudio) no son idénticos, por lo que se tienen 2 cálculos, los cuales se presentan a continuación:

a) Tubería PVC transparente *aguas arriba*, longitud de 2.90 m y masa de 2.387 kg:

- Frecuencia natural de vibración:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} = \frac{2\pi}{0.008} = 785.398 \text{ rad/s}$$

- Constante de amortiguamiento:

$$c = 2m\zeta\omega_n = 2 * 2.387 * .016 * 785.398 = 59.992 \text{ kg/s}$$

- Rigidez

$$k = m\omega_n^2 = 2.387 * (785.398)^2 = 147242.61 \frac{\text{kg.cm}}{\text{s}^2}$$

b) Tubería PVC transparente *aguas abajo*, longitud de 2.35 m y masa de 1.875 kg:

- Frecuencia natural de vibración:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} = \frac{2\pi}{0.008} = 785.398 \text{ rad/s}$$

- Constante de amortiguamiento:

$$c = 2m\zeta\omega_n = 2 * 1.875 * .016 * 785.398 = 47.124 \text{ kg/s}$$

- Rigidez:

$$k = m\omega_n^2 = 1.875 * (785.398)^2 = 1156594.27 \frac{\text{kg.cm}}{\text{s}^2}$$

- Nota: Los resultados presentados en los cálculos mostrados en el presente capítulo fueron realizados mediante una hoja de cálculo y en ella se toman todo los decimales.

En el anexo A.2 se muestra la información procesada para los 6 golpes en forma de tablas.

5.4 Medición de vibración

5.4.1 Ubicación de los acelerómetros

En capítulos anteriores se han mostrado los accidentes que ocurrieron en desfuegos de fondo de diferentes presas, estos problemas se desarrollaron en puntos específicos del túnel de desfogue, particularmente en las zonas donde se generan presiones por debajo de la atmosférica. También se ha mencionado que inmediatamente aguas abajo de las válvulas de compuerta, la energía del flujo se ve alterada de forma significativa debido al estrangulamiento que sufre el flujo, provocando así presiones por debajo de la atmosférica y con ello la presencia del fenómeno de cavitación.

Autores como Thompson (2009) y Seguel (2014) realizaron mediciones de vibración particularmente en tuberías, ambos con sus respectivas variantes, pero coinciden en un aspecto, ellos midieron las vibraciones en la parte superior de la tubería en cuestión. Así

mismo, Wang et al. (2007) y Lian et al. (2019) reportaron sus mediciones sobre un muro guía, ambos de presas, en un punto específico de dichas estructuras.

En base a estos antecedentes se decidió ubicar las mediciones de vibración en zonas cercanas a la compuerta. La ubicación de los puntos de medición se dividió en 2 grupos: aguas arriba (sensor 407) y aguas abajo (sensor 405), los cuales se identificaron con las letras a y b respectivamente, estos a su vez se dividieron en 3 subgrupos: parte superior, media e inferior del conducto con el objetivo de conocer que partes del tubo son las más vulnerables bajo condiciones de cierre parcial de compuerta y condiciones hidráulicas que más adelante se detallan. Las primeras mediciones se realizaron en el punto más cercano a la compuerta (junto a la brida), después se fueron moviendo los sensores a cada 20 cm con respecto a la compuerta. A continuación, en la figura 5.12 se presenta una foto de la zona de medición en el dispositivo y en la figura 5.13 un esquema de los puntos de medición en el conducto.

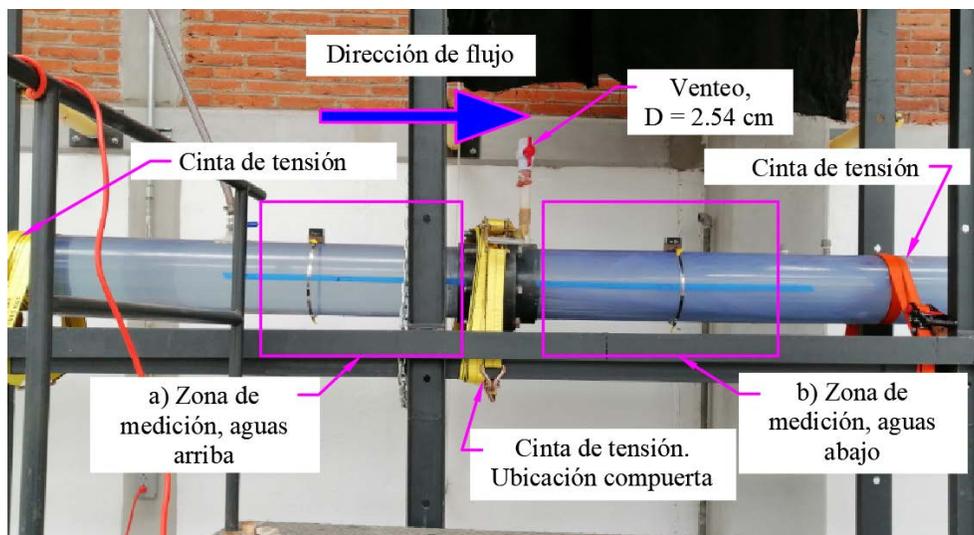


Figura 5.12. Zona de estudio en el dispositivo experimental

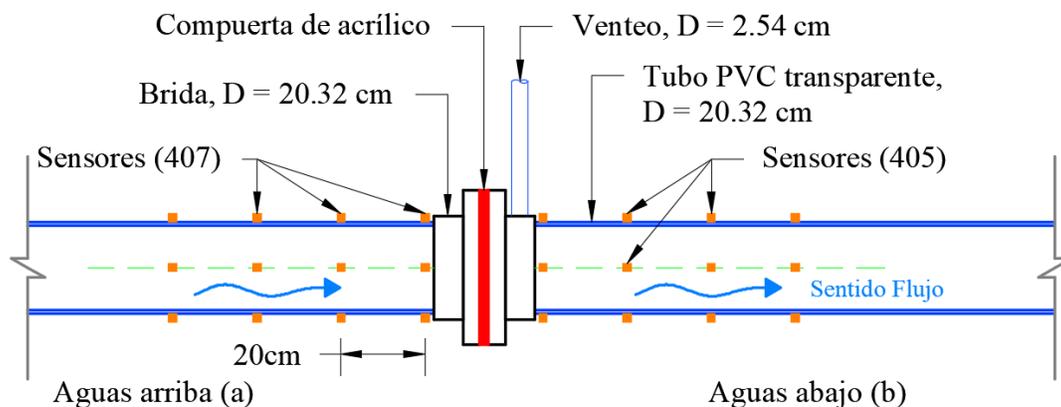


Figura 5.13. Ubicación de los sensores-puntos de medición en el dispositivo

5.4.2 Sujeción de los acelerómetros

Cada acelerómetro está apoyado sobre una pieza de madera con una ranura en la parte inferior, la cual permite el paso de una abrazadera para la sujeción. La tensión a la que estarían sometidas las abrazaderas para sujetar o fijar los sensores a la tubería debía ser prácticamente la misma para cada sensor. La razón es que si una abrazadera quedaba menos tensa con respecto de la otra, las vibraciones no serían representadas con la misma intensidad y el punto de comparación quedaría un poco alejado. Por ello, cada abrazadera debía sujetarse hasta una marca, particularmente esa marca fue el final de la cuerda que tiene cada abrazadera, quedando así la tensión o nivel de sujeción prácticamente iguales. En la figura 5.14 se muestra una foto de lo descrito anteriormente.

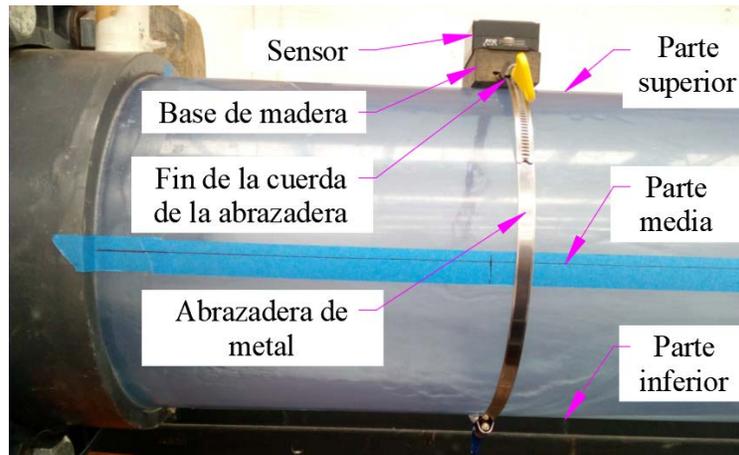


Figura 5.14. Elemento de sujeción para los acelerómetros

5.5 Condiciones hidráulicas

El dispositivo de estudio fue sometido a diferentes condiciones hidráulicas y de porcentajes de apertura de las compuertas antes mencionadas para la medición de vibraciones. Esas condiciones o escenarios fueron el manejo de 5 diferentes gastos compuestos cada uno por flujo libre, presencia de salto hidráulico y mediciones sin venteo. Y así, bajo las condiciones expuestas, determinar qué escenario hidráulico podría afectar más a un desfogue de fondo de presa que es sometido a vibración y con cual compuerta se producen las vibraciones más altas, todo esto reflejado en desplazamientos que pueda sufrir el conducto.

Para determinar el *gasto mínimo*, que fue de 21 litros por segundo (l/s), se utilizó la compuerta del 60% de apertura, que es la que produce menor pérdida, la bomba centrífuga a 20 Hz (mínimo disponible) y un porcentaje de apertura del 64% aproximadamente en la primer válvula de mariposa ($D = 15.24$ cm), el cual, por cuestiones de seguridad, se decidió como el porcentaje mínimo de apertura de dicha válvula. Estos factores dieron como resultado el caudal mencionado y éste fue aumentando 5 l/s para alcanzar los siguientes caudales. Al llegar al gasto 4 se decidió cerrar ese valor a 35 l/s en lugar de 36 l/s y terminar con el caudal 5 a 40 l/s.

El salto hidráulico requerido para las mediciones se generó con ayuda de la segunda válvula de mariposa ($D = 20.32$ cm), la cual tuvo que ser cerrada de forma parcial a distintos porcentajes, según lo requiriera el sistema, para mantener el salto hidráulico estable en la zona de medición. Para las mediciones sin dispositivo aireador, lo que se hizo fue cerrar una válvula que forma parte del venteo, el cual, al no tener entrada de aire en el sistema, provocó que para los 5 gastos utilizados presentara un salto hidráulico completamente ahogado. Estas 3 condiciones hidráulicas se simularon en el dispositivo con excepción de algunas compuertas.

Por la configuración, las características del dispositivo y las condiciones hidráulicas a las que fue sometido, no todos los escenarios para todas las compuertas pudieron simularse. En la tabla 5.4 se muestran los escenarios en general, y en ella se marcan cuáles no fueron posibles simular en dicho dispositivo.

Compuerta (% apertura)	Gasto (l/s)	Con Venteo		Sin Venteo
		Flujo libre (SSH)	Salto hidráulico (CSH)	Salto hidráulico ahogado (SV)
10	21	Si	Si	Si
	26	Si	Si	Si
	31	Si	Si	Si
	35	Si	Si	Si
	40	No	No	No
20, 30, 40	21	Si	Si	Si
	26	Si	Si	Si
	31	Si	Si	Si
	35	Si	Si	Si
	40	Si	Si	Si
50, 60	21	No	Si	Si
	26	No	Si	Si
	31	No	Si	Si
	35	No	Si	Si
	40	No	Si	Si

Tabla 5.4. Escenarios simulados en el dispositivo

Para las compuertas del 50% y 60% de apertura, el sistema no permitió generar un *flujo libre* aguas abajo. Se generó a su vez un salto hidráulico y en el primer caudal el salto fue parcialmente ahogado, por lo que se tomaron mediciones con esta condición y sin dispositivo de aireación.

Las mediciones de vibración utilizando la compuerta del 10% de apertura y el caudal de 40 l/s no se lograron llevar a cabo. Las altas presiones que se generaron, utilizando este porcentaje de apertura y el gasto de 35 l/s, fueron de tal magnitud que el material (acrílico) de la compuerta no pudo resistir esas condiciones. Incluso para las mediciones con dicho caudal (35 l/s), la compuerta de acrílico tuvo que ser reforzada con 8 pequeñas placas de metal (4

en aguas arriba y 4 aguas abajo) fijadas con tornillos y tuercas. Al final de las pruebas con la compuerta del 10% de apertura, ésta sufrió pequeñas grietas en los costados. Por cuestiones de seguridad se decidió no medir el último caudal de 40 l/s. En la figura 5.15 se muestra una foto de esta compuerta.



Figura 5.15. Compuerta del 10% de apertura reforzada con placas de acero y dañada en los costados

5.6 Análisis de las vibraciones

5.6.1 Ajuste inicial de las vibraciones

Al iniciar el proceso de medición, los sensores, además de tener un nivel de fijación a la tubería prácticamente igual, deben estar nivelados con respecto a su posición (superior, media e inferior). Esto quiere decir que el sensor debe estar perfectamente en forma horizontal o vertical, según sea el caso. Como en la práctica es muy difícil mantenerlos en dicha posición, lo que se hace es tratar de nivelar los sensores lo mejor posible y posteriormente ajustar la lectura. Este procedimiento consiste en restarle a la señal original el promedio de la misma señal. Con esto se logra que la señal de vibración inicie en la posición cero y de esta forma, el nivel de vibración será más apegada a la realidad. En la figura 5.16 se muestra una gráfica comparando dichas señales de vibración y se puede observar que la señal ajustada se desplaza alrededor del eje cero.

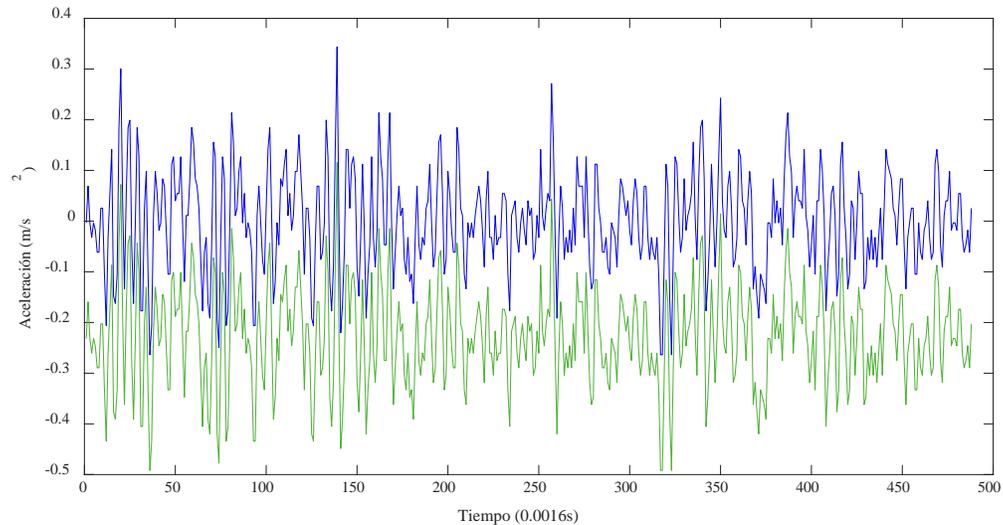


Figura 5.16. Ajuste inicial, señal original (verde) y señal ajustada (azul)

5.6.2 Filtrado de las vibraciones

Una vez ajustada la información de las señales de vibración, se procedió con el filtrado de las mismas. El filtro utilizado en este caso fue del tipo pasa-altas, debido a que las vibraciones de interés se centran en frecuencias relativamente altas, teniendo como referencia la frecuencia natural máxima de vibración que es de 256 Hz (prueba de impacto). Este filtro tiene como propiedad bloquear las frecuencias que se encuentran por debajo de la frecuencia de corte y transmitir todas aquellas componentes de frecuencia que sean mayores a dicho corte.

La frecuencia de corte para el tratamiento de las vibraciones se tomó a 200 Hz, esto con el fin de perder la menor cantidad de información posible. En la figura 5.17 se muestra la comparación entre la señal original ajustada y la señal filtrada mediante un filtro pasa-altas con frecuencia de corte de 200 Hz.

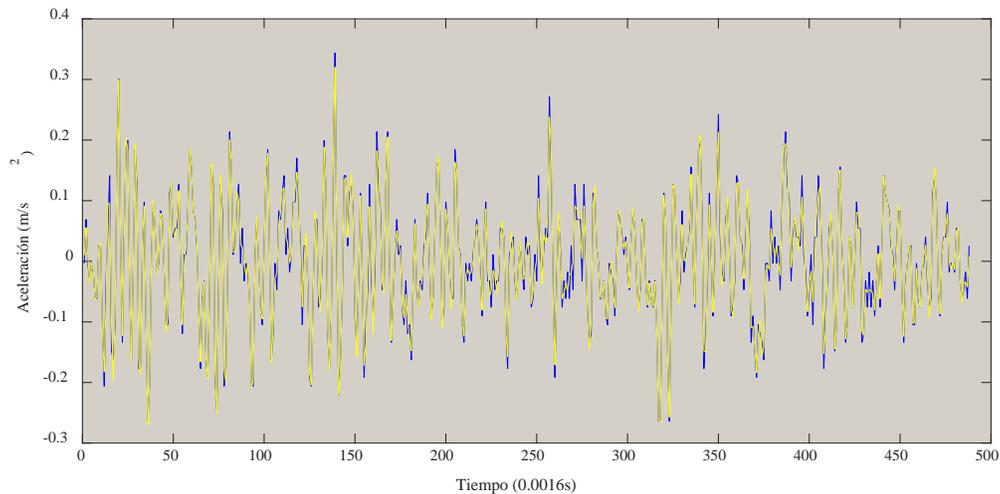


Figura 5.17. Señal de vibración previamente ajustada (azul) y señal filtrada (amarilla)

5.6.3 Análisis espectral

Teniendo la señal ajustada y filtrada se inicia el análisis espectral, que como se dijo en el capítulo 4, el método a utilizar es el de Welch. Este análisis se realizó utilizando el programa MATLAB, el cual cuenta con un comando llamado “pwelch” para realizar dicho análisis por el método mencionado. La gráfica resultante después de realizar el análisis de frecuencia se le conoce como Densidad Espectral de Potencia la cual indica cómo está distribuida esa potencia o energía de la señal estudiada sobre las diferentes frecuencias que la conforman. Dicho de otra forma, la gráfica indica en qué frecuencias se ubican la mayores concentraciones de energía. En la figura 5.18 se muestra una gráfica ajustada y filtrada y en la figura 5.19 se muestra la densidad espectral de potencia de la misma señal donde se observa que la mayor energía se concentra en la frecuencia de 101.9 Hz.

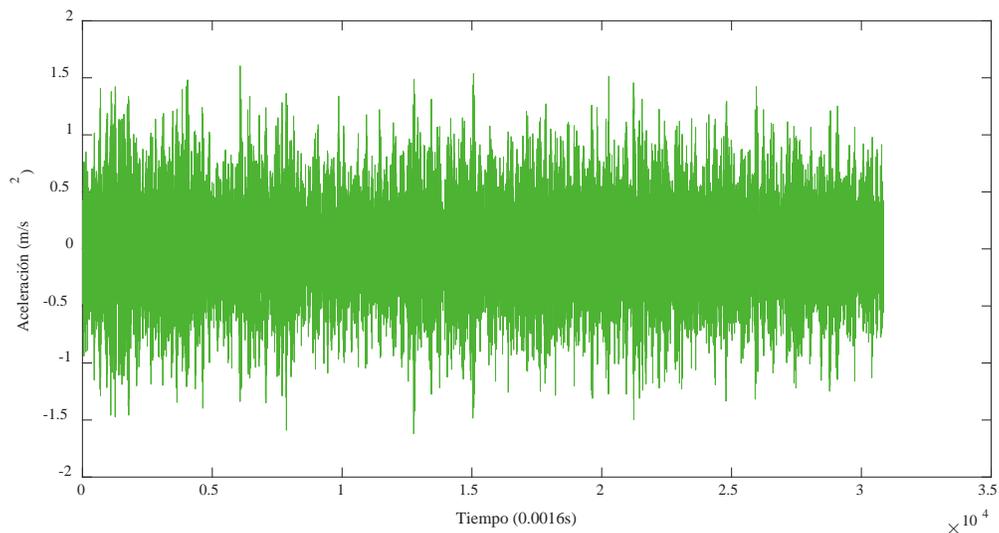


Figura 5.18. Señal de vibración ajustada y filtrada

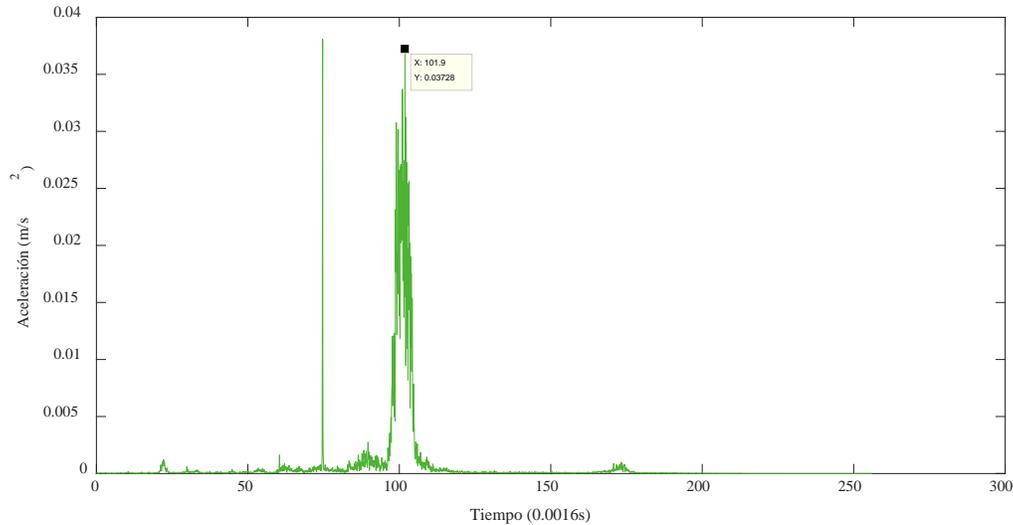


Figura 5.19. Densidad espectral de potencia de la figura 5.18

El ajuste de las mediciones, filtrado y análisis espectral se realizó mediante un código o script dentro del programa MATLAB el cual realiza los tres procesos de forma simultánea. Dicho código se presenta en el anexo A.3.

5.6.4 Cálculo de los desplazamientos

En el apartado 4.8 se mencionó el uso de herramientas de análisis estructural para la obtención de los desplazamientos a partir de la respuesta de vibración. El método utilizado fue el de Diferencia Central, que es un método para analizar estructuras de un solo grado de libertad, es decir, que sólo pueden desplazarse en una sola dirección. El acelerómetro utilizado tiene una capacidad de medición triaxial, es decir, en el sentido “x, y, z”, los cuales se analizan de forma independiente cada uno de ellos, por lo que se les considera que poseen un grado de libertad, ya que oscilan en su propio eje.

Los desplazamientos que pueda sufrir una estructura dependen, en este caso, de la magnitud de las vibraciones, de la geometría y de las características del material de la tubería. Por esto surgió la necesidad de obtener parámetros estructurales del dispositivo. El método de la Diferencia Central requiere de los parámetros mencionados en el apartado 5.3.3 que son: el periodo de vibración (T_n), la fracción de amortiguamiento (ζ), frecuencia natural de vibración (ω_n), constante de amortiguamiento (c) y rigidez (k).

En el apartado 4.8.2 se indican los cálculos iniciales para éste método, los cuales se realizan a continuación, recordando que entre los tramos de tubería de aguas arriba y aguas abajo existen diferencias geométricas:

1. Cálculos iniciales (aguas arriba):

$$\text{masa (m)} = 2.387 \text{ kg}$$

$$\text{rigidez } (k) = 1472421.61 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$$

$$\text{constante amortiguamiento } (c) = 59.99 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{incremento de tiempo } (\Delta t) = 0.00162\text{s}$$

$$\text{desplazamiento inicial } (u_0) = 0$$

$$1.1 \quad \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m} = 0 \text{ (aceleración inicial)}$$

$$1.2 \quad u_{-1} = u_0 \Delta t \dot{u}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_0 = 0 \text{ (desplazamiento inicial - 1)}$$

$$1.3 \quad \hat{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} = \frac{2.387}{0.00162^2} + \frac{59.99}{(2)(0.00162)} = 928057.233$$

$$1.4 \quad a = \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} = \frac{2.387}{0.00162^2} - \frac{59.99}{(2)(0.00162)} = 891025.224$$

$$1.5 \quad b = k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} = 1472421.61 - \frac{(2)(2.387)}{0.00162^2} = -346660.85$$

2. Cálculos para el tiempo de paso i :

$$2.1 \quad \hat{p}_i = p_i - au_{i-1} - bu_i = p_i - 891025.224u_{i-1} + 346660.85u_i$$

$$2.2 \quad u_{i+1} = \frac{\hat{p}_i}{\hat{k}} = \frac{\hat{p}_i}{928057.233}$$

3. Cálculos iniciales (aguas abajo):

$$\text{masa } (m) = 1.875 \text{ kg}$$

$$\text{rigidez } (k) = 1156594.27 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$$

$$\text{constante amortiguamiento } (c) = 47.12 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{incremento de tiempo } (\Delta t) = 0.00162\text{s}$$

$$\text{desplazamiento inicial } (u_0) = 0$$

$$3.1 \quad \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m} = 0 \text{ (aceleración inicial)}$$

$$3.2 \quad u_{-1} = u_0 \Delta t \dot{u}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_0 = 0 \text{ (desplazamiento inicial - 1)}$$

$$3.3 \quad \hat{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} = \frac{1.875}{0.00162^2} + \frac{47.12}{(2)(0.00162)} = 728993.427$$

$$3.4 \quad a = \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} = \frac{1.875}{0.00162^2} - \frac{47.12}{(2)(0.00162)} = 699904.606$$

$$3.5 \quad b = k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} = 1156594.27 - \frac{(2)(1.875)}{0.00162^2} = -272303.768$$

4. Cálculos para el tiempo de paso i :

$$4.1 \quad \hat{p}_i = p_i - au_{i-1} - bu_i = p_i - 699904.606u_{i-1} + 27230.768u_i$$

$$4.2 \quad u_{i+1} = \frac{\hat{p}_i}{\hat{k}} = \frac{\hat{p}_i}{728993.427}$$

El cálculo de los desplazamientos del conducto se realizó a través de una hoja de cálculo programada, la cual permite la entrada de datos de vibración (ajustada y filtrada) y realiza dicho cálculo de forma automática. Cabe mencionar que para el cálculo de los desplazamientos no interviene el análisis de potencia espectral.

Los desplazamientos resultantes se representan como en la figura 5.20, de la cual se extrae la información de interés, que es el desplazamiento promedio y el desplazamiento pico o máximo, en ambos casos los máximos absolutos.

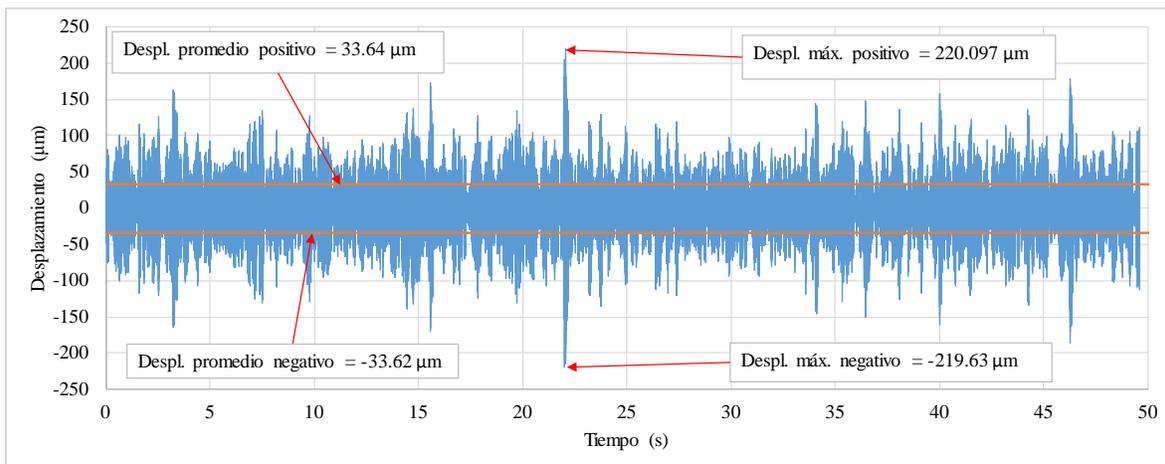


Figura 5.20. Gráfica de desplazamiento y sus elementos de estudio

Los desplazamientos promedio y pico o máximos negativos físicamente no existen, pero en este caso, por ser el cero (0) el punto de referencia de los desplazamientos, en general se representan de esa manera. Por esa razón se determina como desplazamiento promedio máximo y pico máximo los valores absolutos, que en este caso son 33.64 µm y 220.1 µm respectivamente. Estos son los datos de interés para la presente tesis.

6 Resultados

Las mediciones de vibración en el dispositivo se realizaron con cada compuerta, cada caudal y condición hidráulica, aguas arriba y aguas abajo con respecto de la ubicación de la compuerta. Las muestras de vibración se procesaron mediante los métodos mencionados en el capítulo anterior. También se comentó, que para el cálculo de los desplazamientos, no intervenía de manera directa el análisis espectral de potencia, ya que dicho cálculo no requiere modificar o transformar la señal, es decir, se analiza directamente la señal con su previo ajuste y filtrado.

Los resultados se dividieron en 3 categorías: A superficie libre sin salto hidráulico, con salto hidráulico y sin dispositivo aireador o venteo, estos a su vez se denominaron con la nomenclatura: SSH, CSH y SV respectivamente.

Es importante recordar que las mediciones se realizaron aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, las cuales se clasificaron en “a” y “b” respectivamente. Aunado a esto, las mediciones se realizaron en tres zonas distintas de la tubería: Parte superior, media e inferior.

En el presente capítulo se muestran resultados de los desplazamientos utilizando las compuertas de 10% a 60% de apertura *únicamente con el gasto máximo* a las que fueron sometidas. Para los resultados de flujo de aire y presión se muestran todos los caudales manejados. Por su parte, las gráficas de densidad de potencia espectral se encuentran en el anexo A.4.

6.1 A superficie libre sin salto hidráulico (SSH)

6.1.1 Compuerta del 10% de apertura

Los escenarios se presentan en tablas, en este caso la tabla 6.1 presenta los correspondientes a la compuerta del 10% de apertura, para ésta se manejaron 4 diferentes caudales. La columna ω_{Bomba} es la frecuencia en Hz a la que opera la bomba para proporcionar los caudales requeridos. Para el cálculo del número de Froude Fr se midió el perímetro mojado aguas abajo de la compuerta y, a partir de este dato, se obtuvo el tirante h de manera muy aproximada, ya que la medición del tirante de manera directa fue prácticamente imposible. El gasto o flujo de aire que demandaba el sistema se determinó a partir de la información de velocidad de aire obtenida con el anemómetro y las características geométricas del venteo, se obtuvieron valores promedio de los gastos de aire y en la figura 6.1 se muestran los valores puntuales.

Compuerta	ω_{Bomba}	Gasto	Velocidad	h	Fr	Venteo	
(% apertura)	(Hz)	(l/s)	(m/s)	(m)	(adim)	V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
10	30.50	21.22	6.54	0.03	11.500	19.69	9.98
	35.50	26.07	8.04	0.03	14.129	26.27	13.31
	42.00	31.01	9.56	0.03	16.806	31.11	15.76
	47.00	35.04	10.81	0.03	18.990	37.89	19.20

Tabla 6.1. Escenarios para la compuerta del 10% de apertura, SSH

Para las condiciones mostradas en la tabla 6.1, se presenta la gráfica de velocidades de aire en el dispositivo aireador, las cuales van directamente ligadas con la presión (sub-presión) de operación del sistema aguas abajo de la compuerta. En la figura 6.1 se muestra una gráfica que representa el flujo de aire que requirió el sistema para los diferentes caudales manejados. El tiempo de medición corresponde a un minuto, en el cual se observa que la variación del flujo de aire tuvo un comportamiento sin variaciones u oscilaciones importantes, es decir, la demanda de aire fue prácticamente constante.

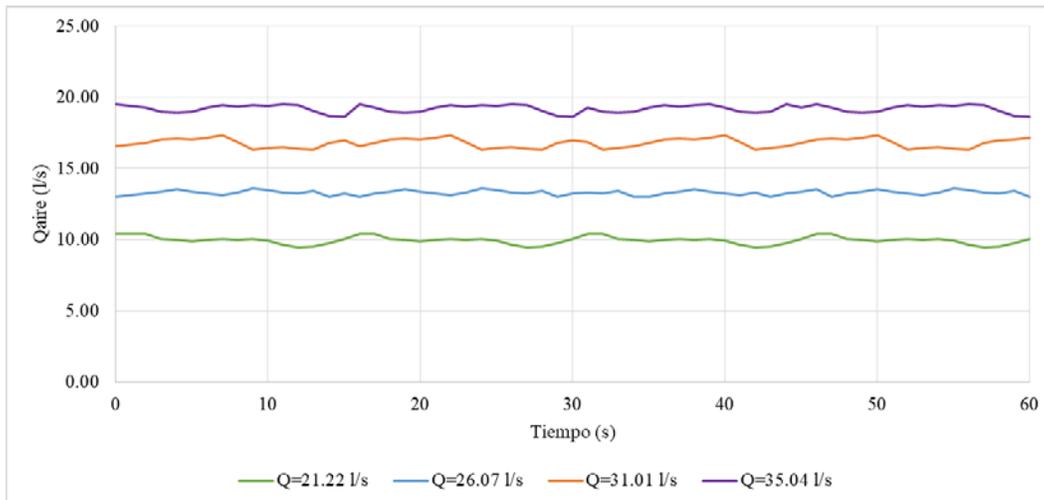


Figura 6.1. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 10% de apertura, SSH

Para el caso de las presiones, corresponden a una medición de un minuto, tiempo en el que se puede apreciar el comportamiento de dichas presiones para cada caudal utilizado. En la figura 6.2 se presenta una gráfica que indica la presión atmosférica en milímetros de mercurio (mmHg) y a partir de dicho parámetro, las presiones correspondientes a los caudales

utilizados. Los resultados muestran presiones por debajo de la atmosférica, lo cual indica que el sistema trabajó con sub-presiones.

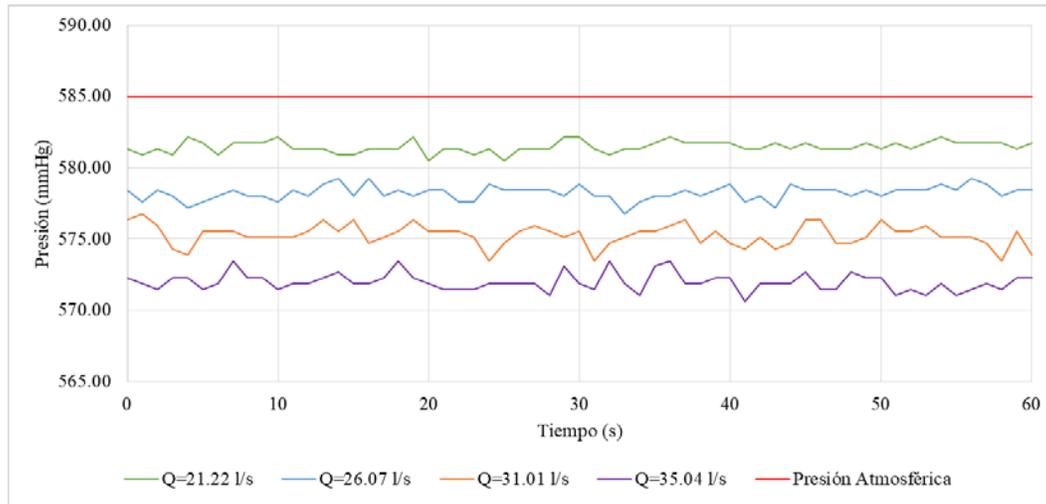


Figura 6.2. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 10% de apertura, SSH

Los desplazamientos calculados, tanto aguas arriba (a) como aguas abajo (b), se presentan en una misma gráfica y a partir de ésta comienzan a desglosarse los resultados. Por una parte se tienen los desplazamientos máximos y promedio, en ambos casos los máximos absolutos. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos en la parte superior, media e inferior de forma independiente, ya que al representar esos desplazamientos en tres direcciones, estos podrían causar confusión entre los resultados si se ubicaran en una misma gráfica. Dichos desplazamientos, presentados en este capítulo, corresponden a los calculados utilizando el caudal máximo, que en este caso fue de 35 l/s.

En las figuras 6.3 y 6.4 se representan los desplazamientos máximos y promedio respectivamente, aguas arriba y aguas abajo de la parte superior del conducto. En las figuras 6.5 y 6.6 los correspondientes a la parte media del tubo, y en las figuras 6.7 y 6.8 los obtenidos en la parte inferior del tubo. El esquema superior izquierdo de cada figura indica de manera gráfica la zona y el sentido correspondientes a esos desplazamientos, es decir, los desplazamientos en sentido “x” se muestran en verde, los obtenidos en “y” son rojos y por su parte los desplazamientos en “z” son representados por el color azul.

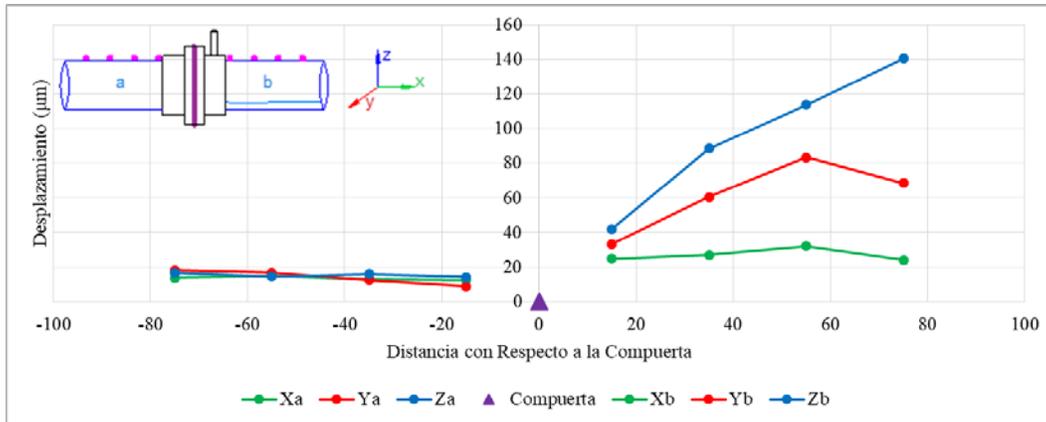


Figura 6.3. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04 \text{ l/s}$

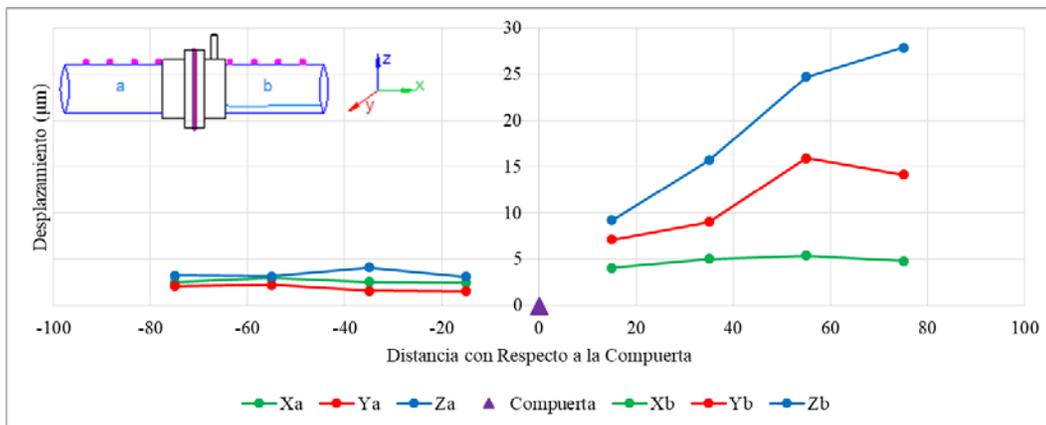


Figura 6.4. Desplazamientos promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04 \text{ l/s}$

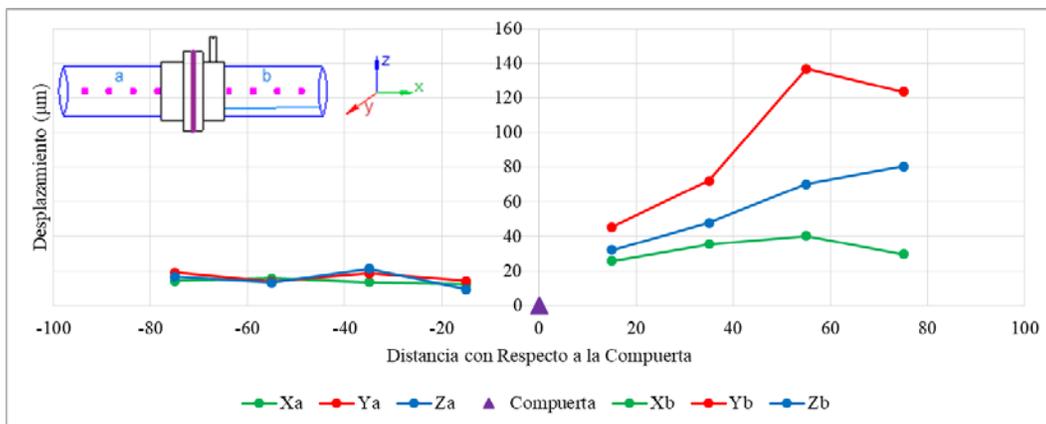


Figura 6.5. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04 \text{ l/s}$

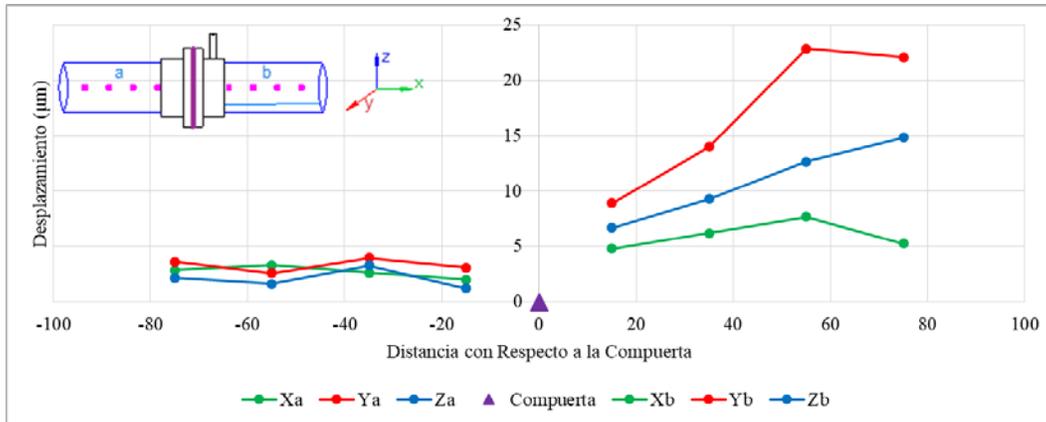


Figura 6.6. Desplazamientos promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04 \text{ l/s}$

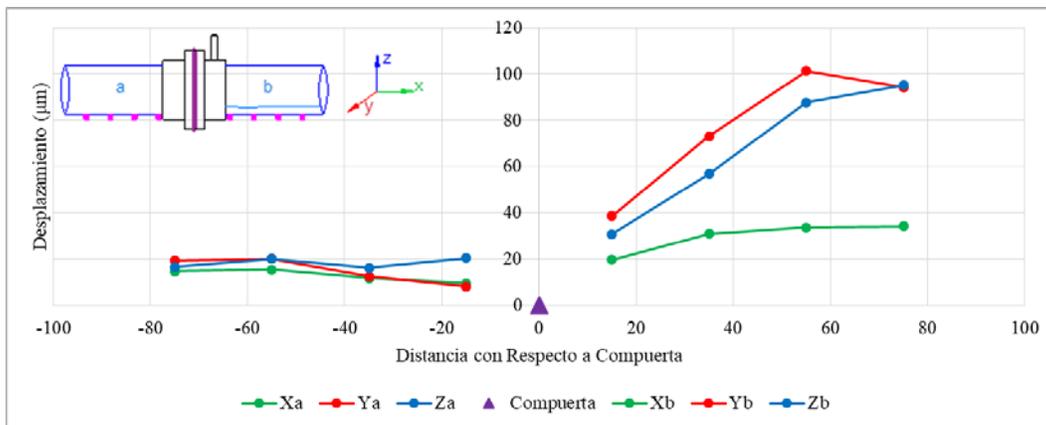


Figura 6.7. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04 \text{ l/s}$

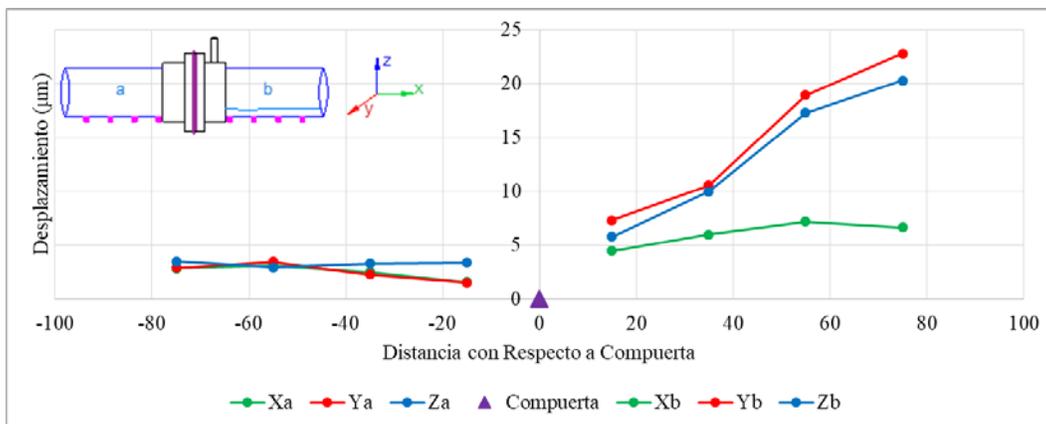


Figura 6.8. Desplazamientos promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SSH, $Q = 35.04 \text{ l/s}$

Como puede observarse, los desplazamientos máximos tienden a ser mucho mayores que los desplazamientos promedio, por esa razón y para tener mayor fluidez en la presentación de los resultados, a partir de la compuerta del 20% de apertura se muestran únicamente las

gráficas con los desplazamientos máximos, es decir, los mayores desplazamientos para cada caso. Los desplazamientos promedio de cada compuerta se muestran en el anexo A.5.

6.1.2 Compuerta del 20% de apertura

Para las compuertas del 20% al 40% de apertura, se calcularon los desplazamientos máximos utilizando 5 gastos. La tabla 6.2 muestra los escenarios para la compuerta del 20% de apertura. Además, en las figuras 6.9 y 6.10 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.11 a 6.13.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)	h (m)	Fr (adim)	Venteo	
						V _{aire} (m/s)	Q _{aire} (l/s)
20	22.00	21.73	3.35	0.05	4.832	7.49	3.80
	25.50	26.59	4.10	0.05	5.913	12.05	6.11
	29.00	31.11	4.80	0.05	6.918	20.21	10.24
	32.70	35.13	5.42	0.05	7.812	27.07	13.72
	37.30	40.46	6.24	0.05	8.998	32.89	16.67

Tabla 6.2. Escenarios para la compuerta del 20% de apertura, SSH

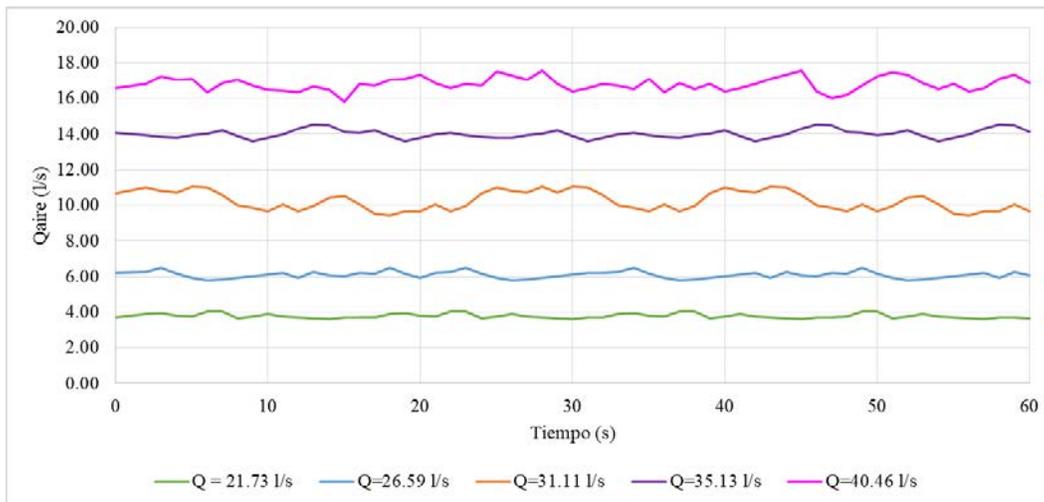


Figura 6.9. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 20% de apertura, SSH

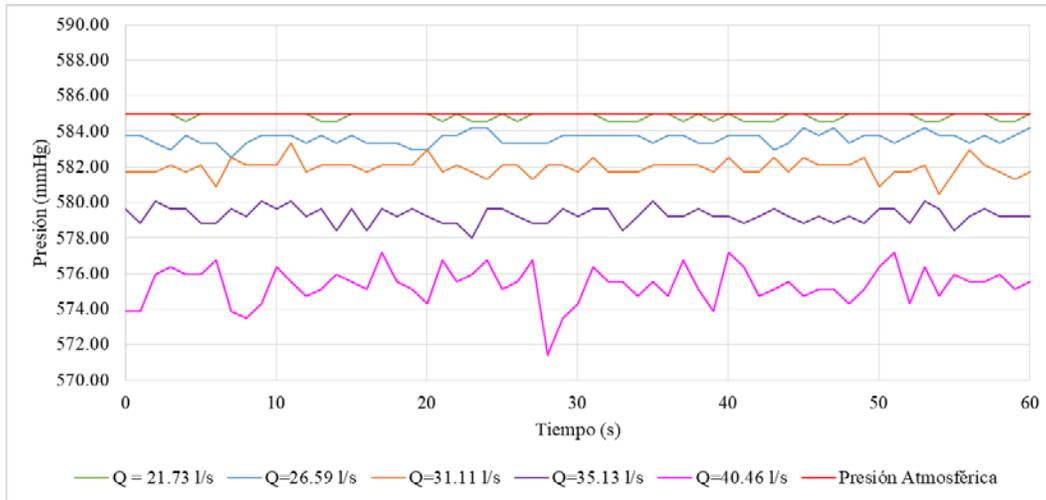


Figura 6.10. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 20% de apertura, SSH

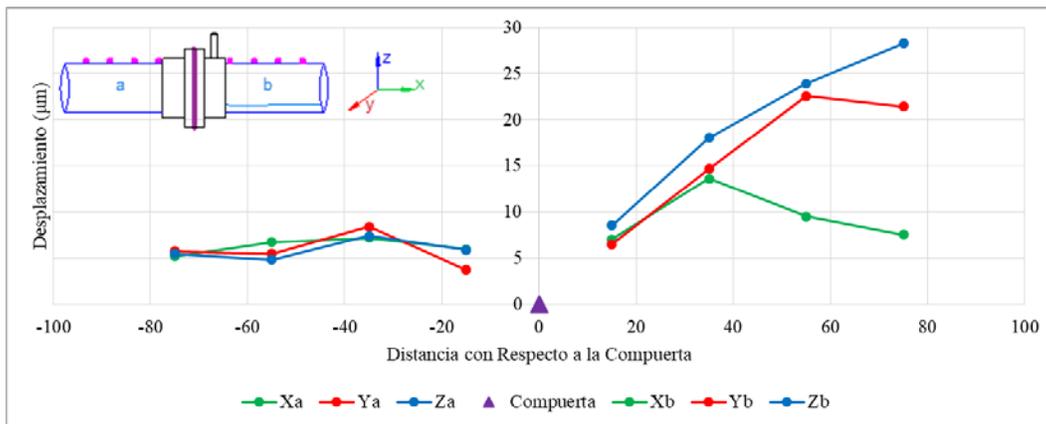


Figura 6.11. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46 \text{ l/s}$

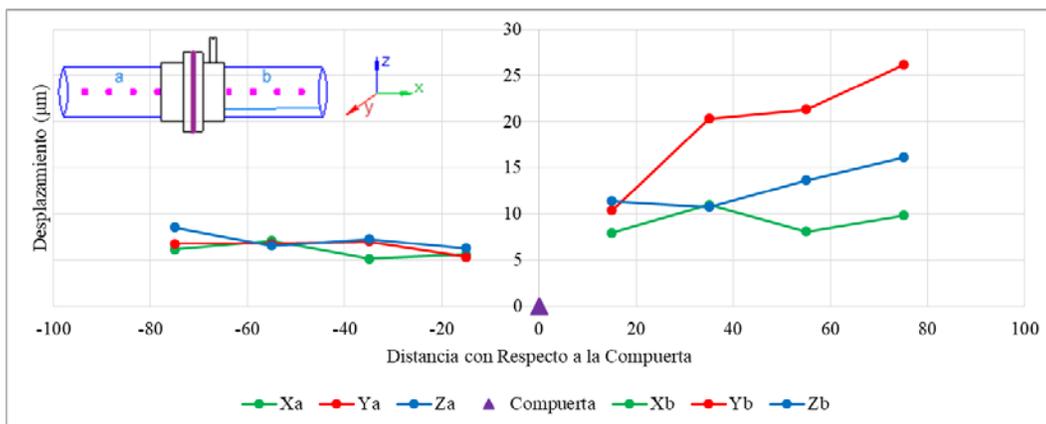


Figura 6.12. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46 \text{ l/s}$

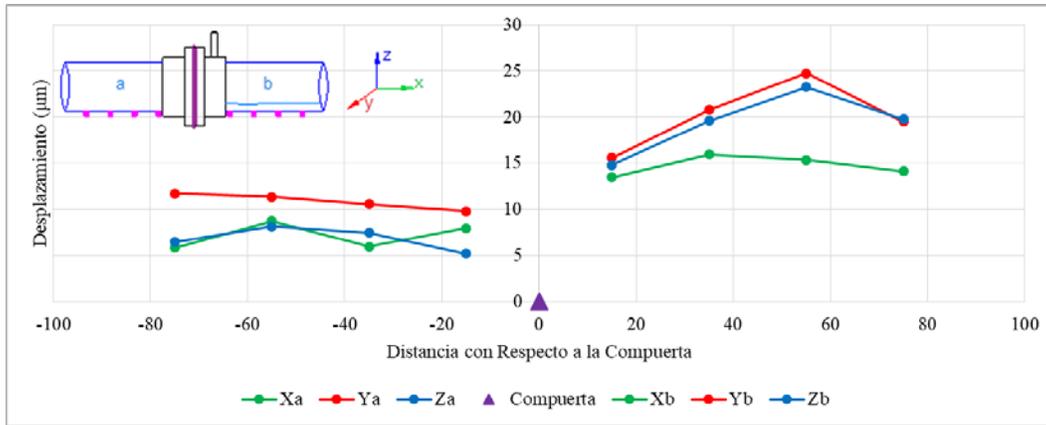


Figura 6.13. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46 \text{ l/s}$

6.1.3 Compuerta del 30% de apertura

La tabla 6.3 muestra los escenarios para la compuerta del 30% de apertura. En las figuras 6.14 y 6.15 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.16 a 6.18.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)	h (m)	Fr (adim)	Venteo	
						V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
30	20.00	21.76	2.24	0.06	2.965	7.40	3.75
	22.90	26.36	2.71	0.06	3.592	9.87	5.00
	25.80	31.35	3.22	0.06	4.272	13.55	6.87
	28.20	35.27	3.63	0.06	4.806	15.79	8.00
	32.20	40.56	4.17	0.06	5.527	20.57	10.42

Tabla 6.3. Escenarios para la compuerta del 30% de apertura, SSH

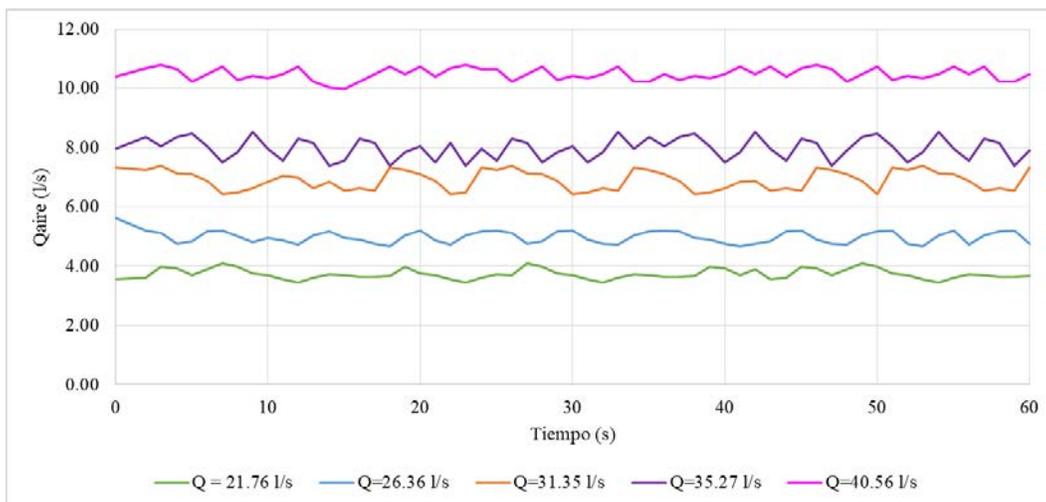


Figura 6.14. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 30% de apertura, SSH

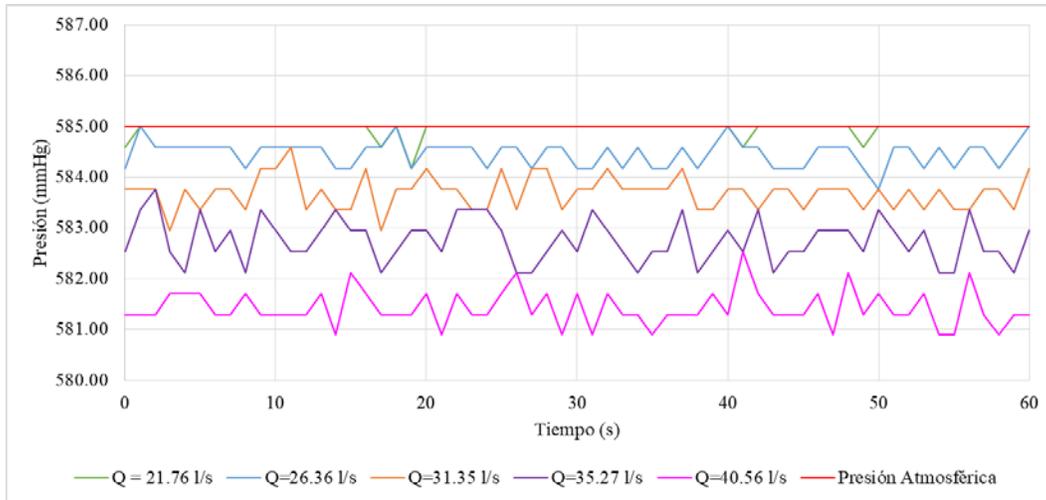


Figura 6.15. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 30% de apertura, SSH

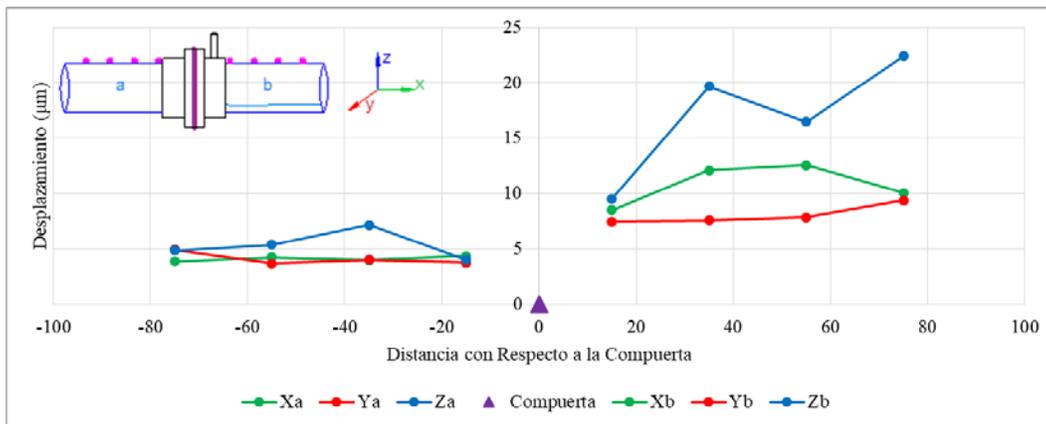


Figura 6.16. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56 \text{ l/s}$

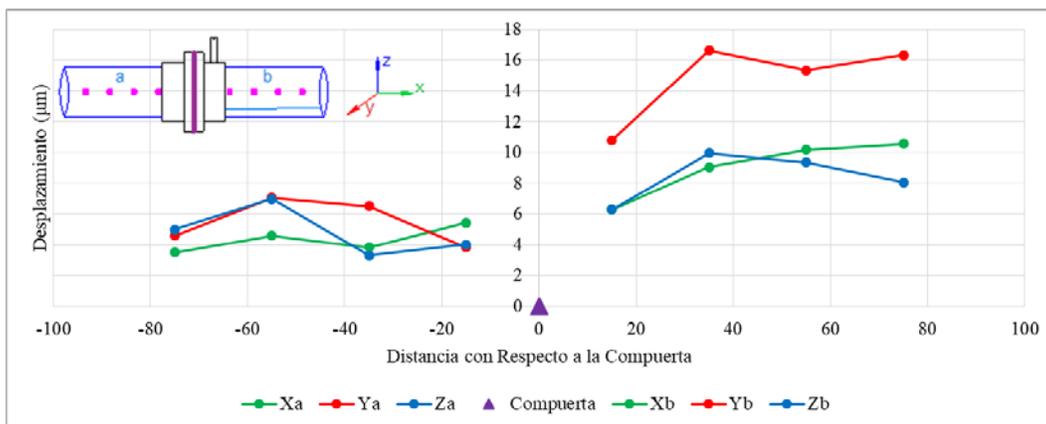


Figura 6.17. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56 \text{ l/s}$

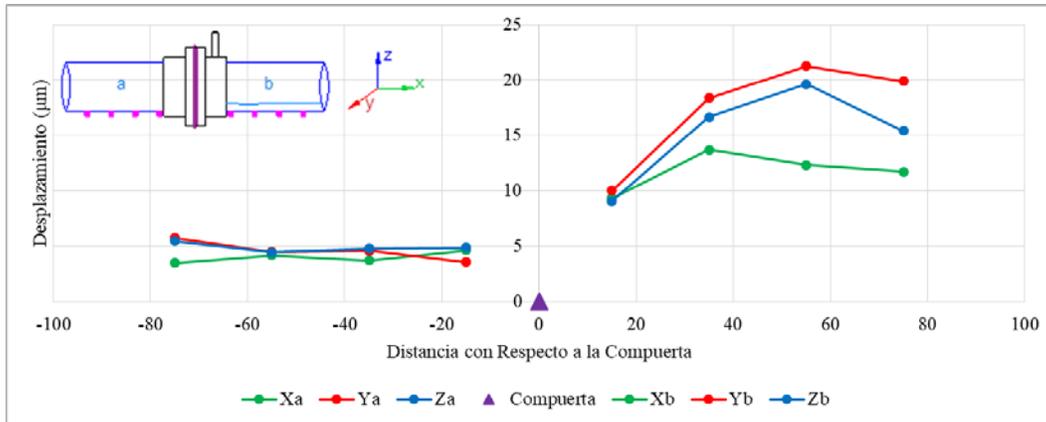


Figura 6.18. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56 \text{ l/s}$

6.1.4 Compuerta del 40% de apertura

La tabla 6.4 muestra los escenarios para la compuerta del 40% de apertura, dentro de esta tabla se observa una pestaña roja en la frecuencia de la bomba de 20 Hz, esto indica, y para el resto de las tablas de los escenarios, que la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro tuvo que ser cerrada de manera parcial para obtener el gasto de interés, es decir, la válvula funcionó aproximadamente a un 70% de apertura, logrando así el caudal requerido de 21.61 l/s. En las figuras 6.19 y 6.20 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.21 a 6.23.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)	h (m)	Fr (adim)	Venteo	
						V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
40	20.00	21.61	1.67	0.07	1.955	4.57	2.32
	21.00	26.83	2.07	0.07	2.428	5.39	2.73
	23.50	31.14	2.40	0.07	2.818	6.35	3.22
	26.50	35.39	2.73	0.07	3.202	9.59	4.86
	29.80	40.22	3.10	0.07	3.639	11.46	5.81

Tabla 6.4. Escenarios para la compuerta del 40% de apertura, SSH

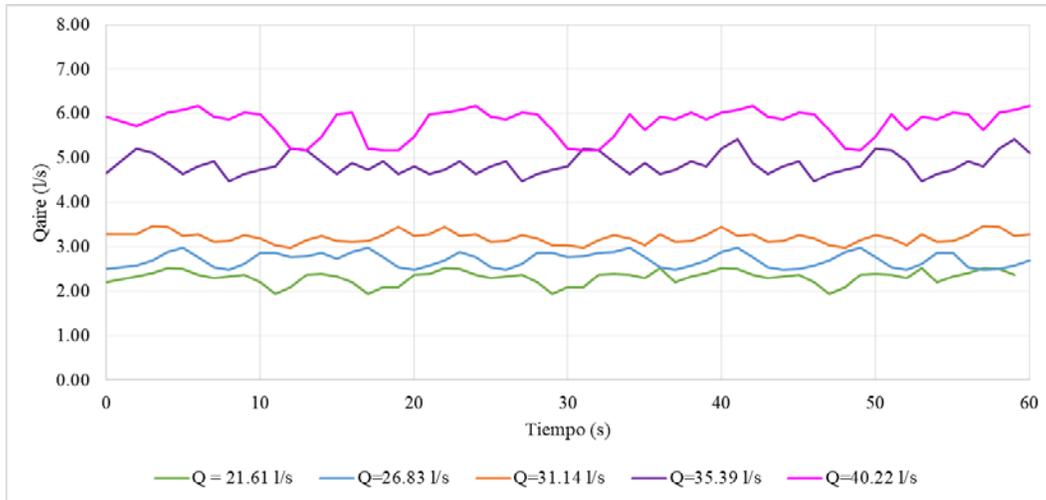


Figura 6.19. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 40% de apertura, SSH

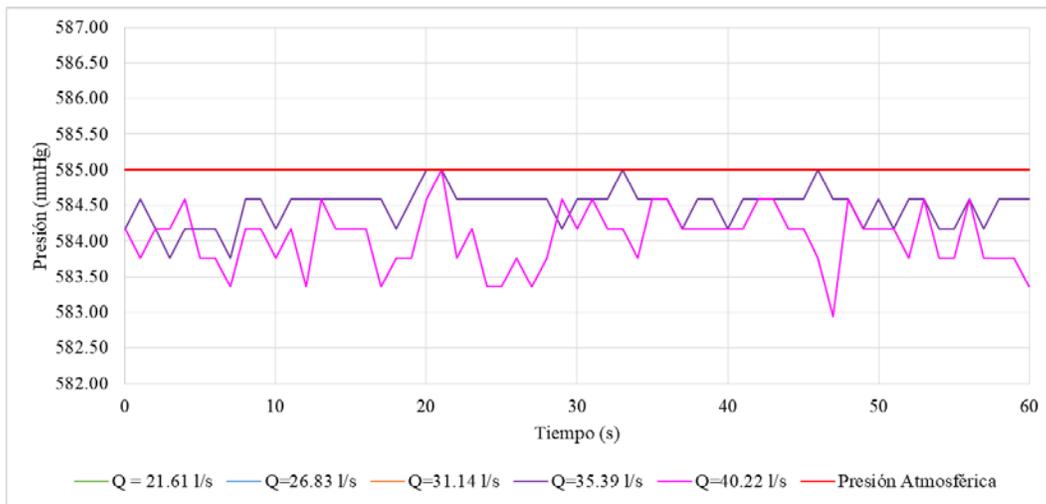


Figura 6.20. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 40% de apertura, SSH

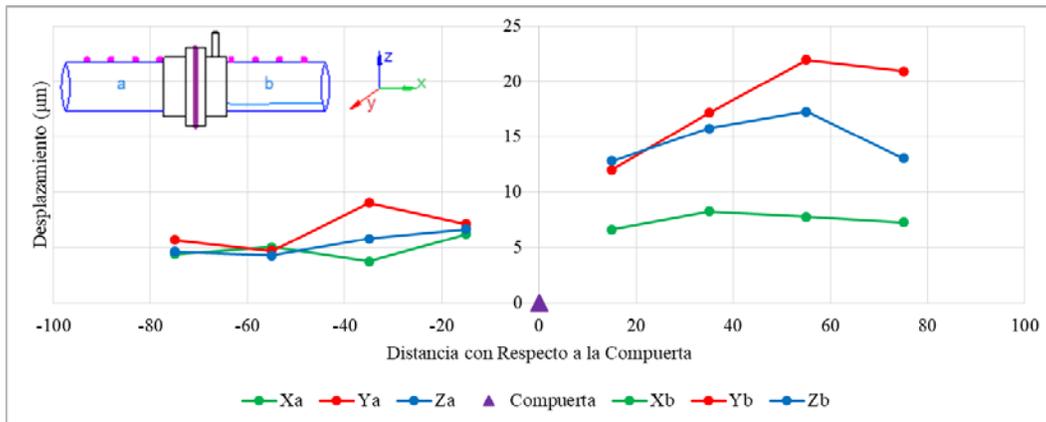


Figura 6.21. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, $Q = 40.22 \text{ l/s}$

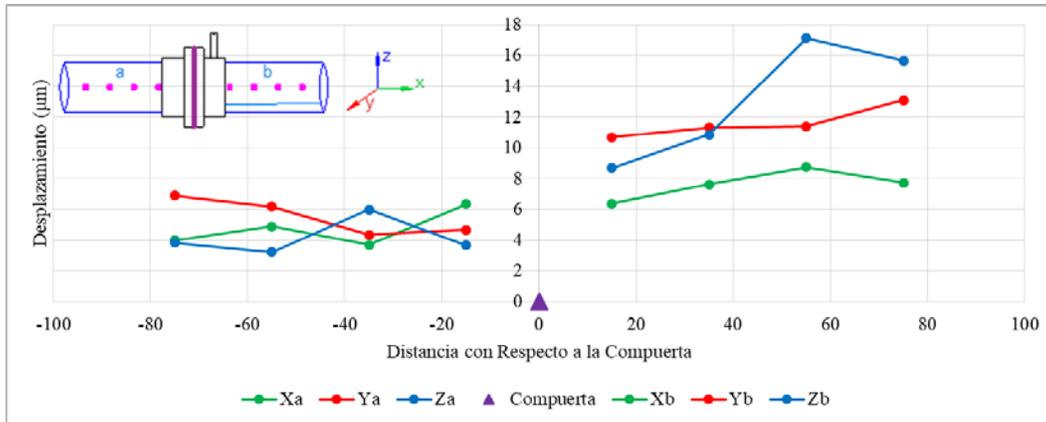


Figura 6.22. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, $Q = 40.22 \text{ l/s}$

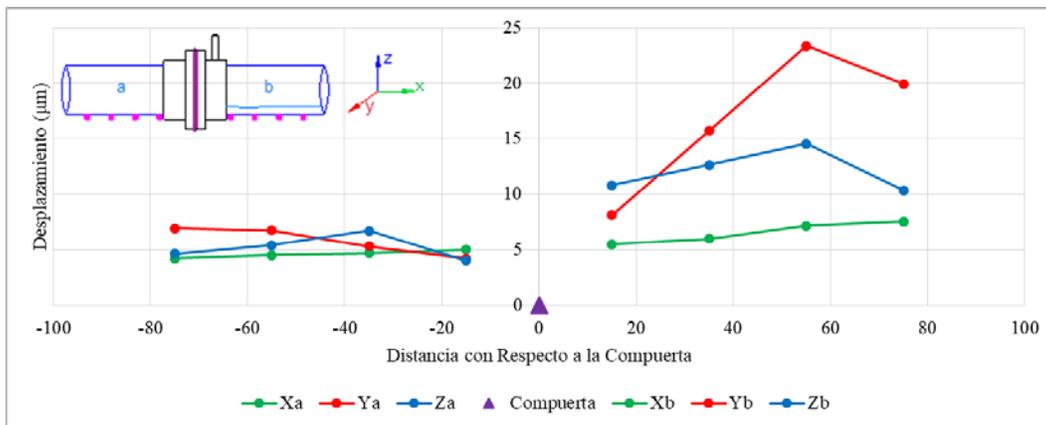


Figura 6.23. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, $Q = 40.22 \text{ l/s}$

6.2 Escenarios con salto hidráulico (CSH)

6.2.1 Compuerta del 10% de apertura

La tabla 6.5 muestra los escenarios para la compuerta del 10% de apertura. En esta tabla aparecen dos variables más, la distancia del inicio del salto hidráulico con respecto a la compuerta (SH-Inicio) y la longitud del salto hidráulico (SH-Long.). En las figuras 6.24 y 6.25 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.26 a 6.28 en las cuales se observa un incremento importante en los desplazamientos máximos en comparación con los obtenidos con el flujo a superficie libre sin salto hidráulico con la misma compuerta (figuras 6.3, 6.5 y 6.7).

Compuerta	ω_{Bomba}	Gasto	Velocidad	SH-Inicio	SH-Long.	h	Fr	Venteo	
(% apertura)	(Hz)	(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(adim)	V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
10	30.50	21.76	6.71	0.30	0.93	0.03	11.79	18.36	9.30
	35.70	26.03	8.03	0.45	1.05	0.03	14.11	20.94	10.61
	42.00	31.28	9.65	0.40	1.30	0.03	16.95	28.08	14.23
	47.00	35.24	10.87	0.50	1.70	0.03	19.10	28.28	14.33

Tabla 6.5. Escenarios para la compuerta del 10% de apertura, CSH

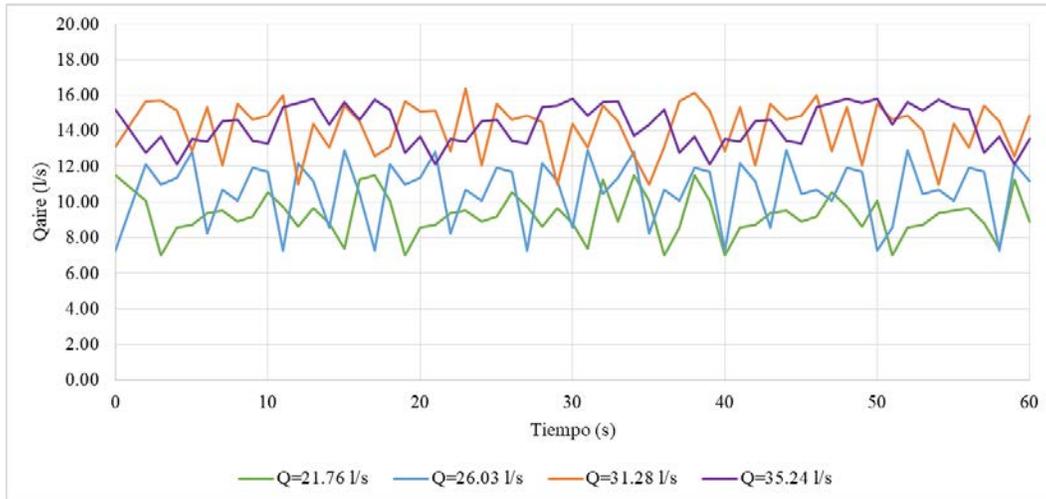


Figura 6.24. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 10% de apertura, CSH

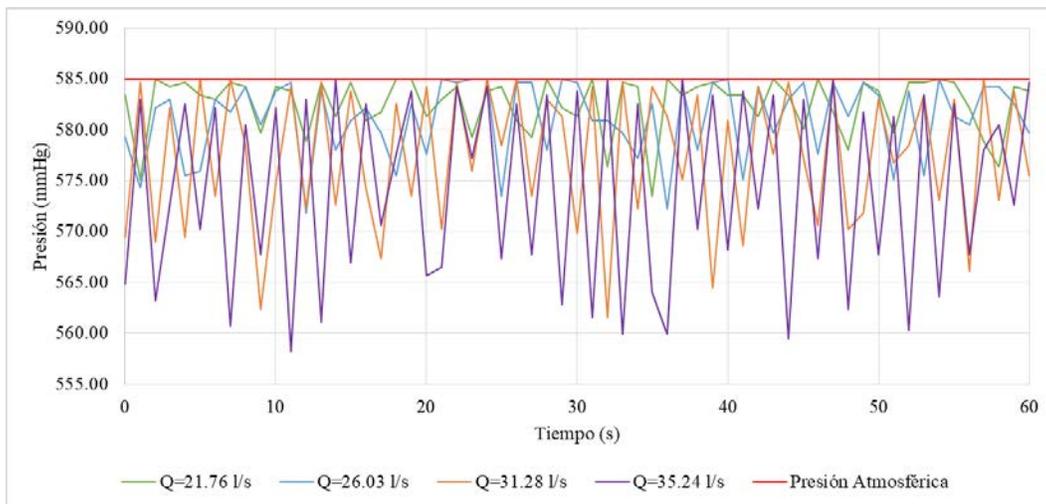


Figura 6.25. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 10% de apertura, CSH

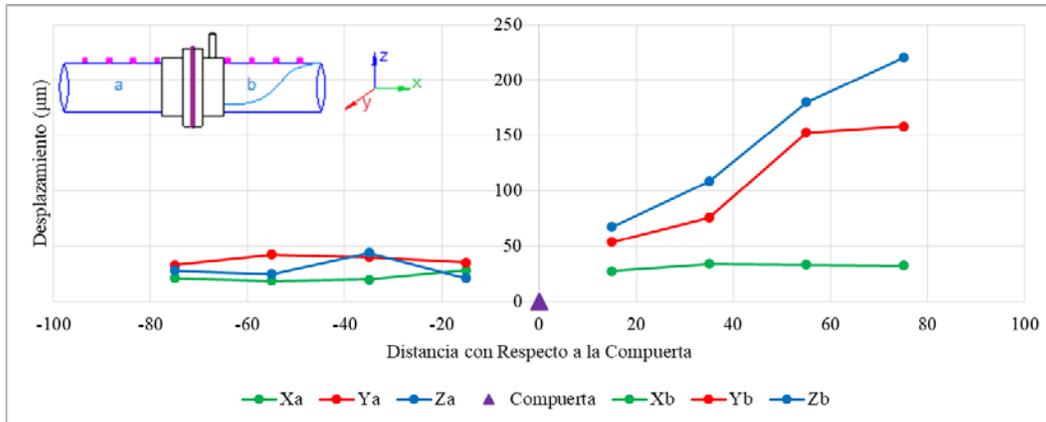


Figura 6.26. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24 \text{ l/s}$

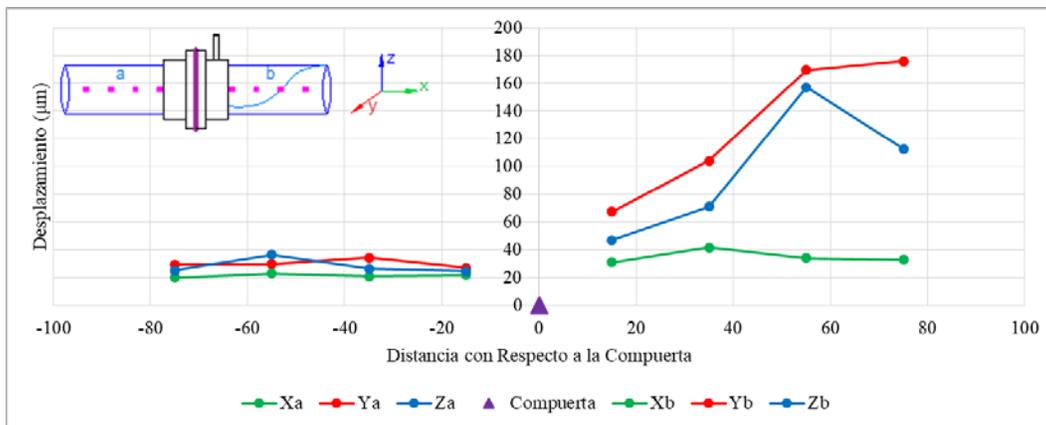


Figura 6.27. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24 \text{ l/s}$

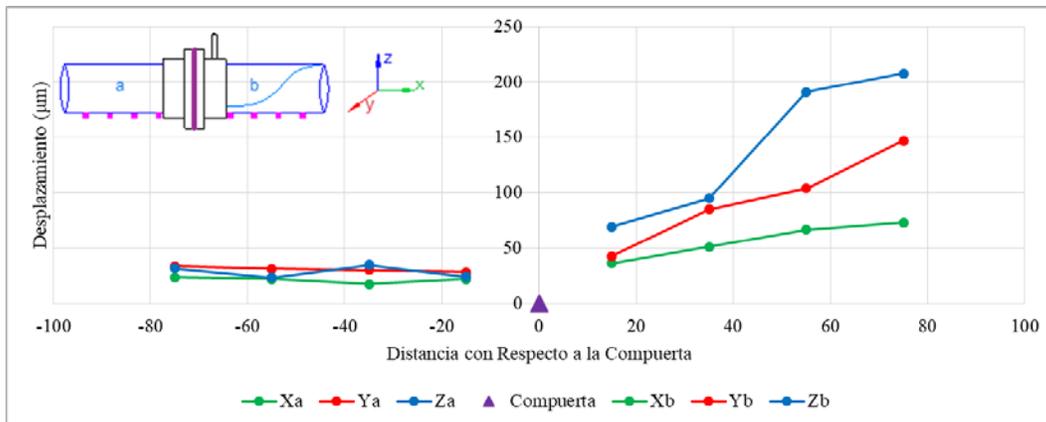


Figura 6.28. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24 \text{ l/s}$

6.2.2 Compuerta del 20% de apertura

La tabla 6.6 muestra los escenarios para la compuerta del 20% de apertura. En las figuras 6.29 y 6.30 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.31 a 6.33.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba}	Gasto	Velocidad	SH-Inicio	SH-Long.	h	Fr	Venteo	
	(Hz)	(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(adim)	V _{aire} (m/s)	Q _{aire} (l/s)
20	22.00	21.64	3.34	0.25	0.85	0.05	4.81	9.41	4.77
	25.50	26.70	4.12	0.40	0.90	0.05	5.94	14.00	7.09
	29.00	31.21	4.81	0.35	0.90	0.05	6.94	16.43	8.33
	33.00	35.17	5.42	0.35	0.95	0.05	7.82	17.36	8.80
	37.40	40.36	6.22	0.42	0.95	0.05	8.98	23.54	11.93

Tabla 6.6. Escenarios para la compuerta del 20% de apertura, CSH

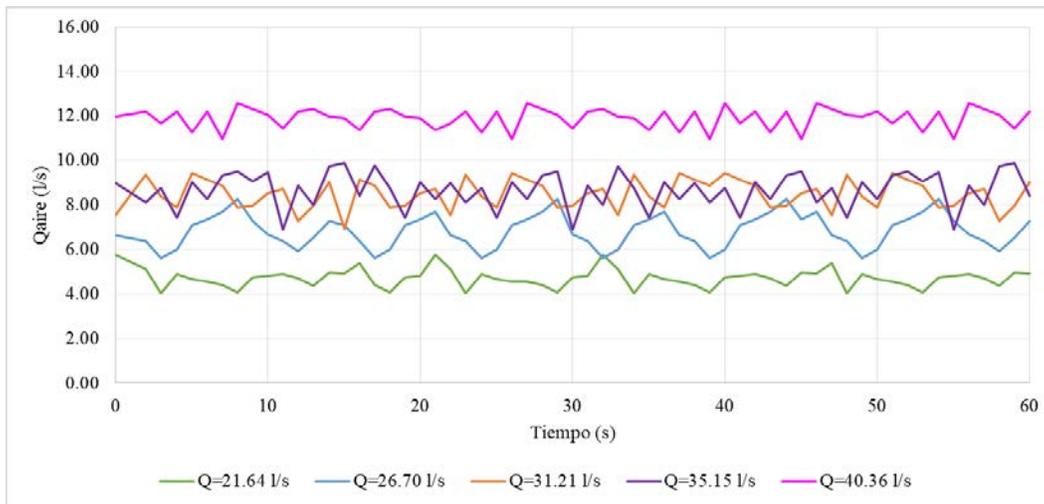


Figura 6.29. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 20% de apertura, CSH

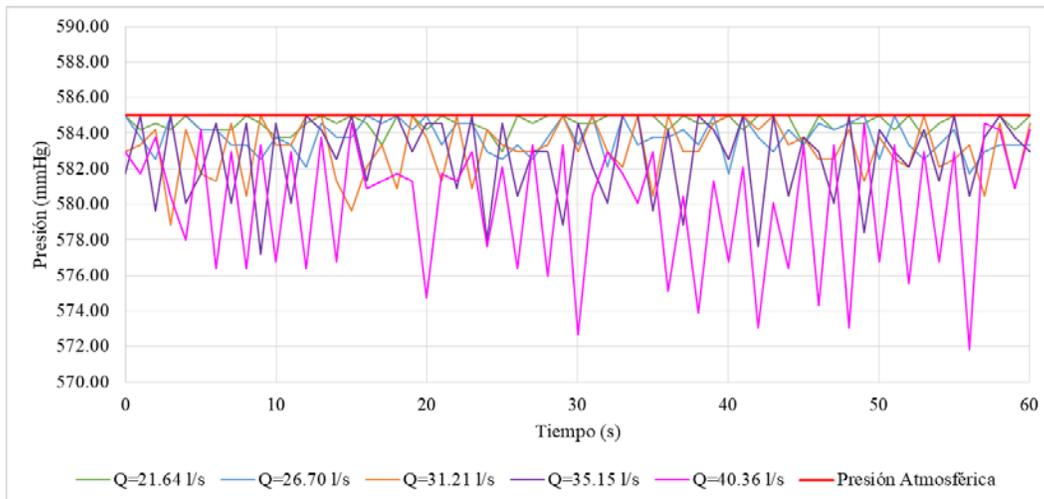


Figura 6.30. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 20% de apertura, CSH

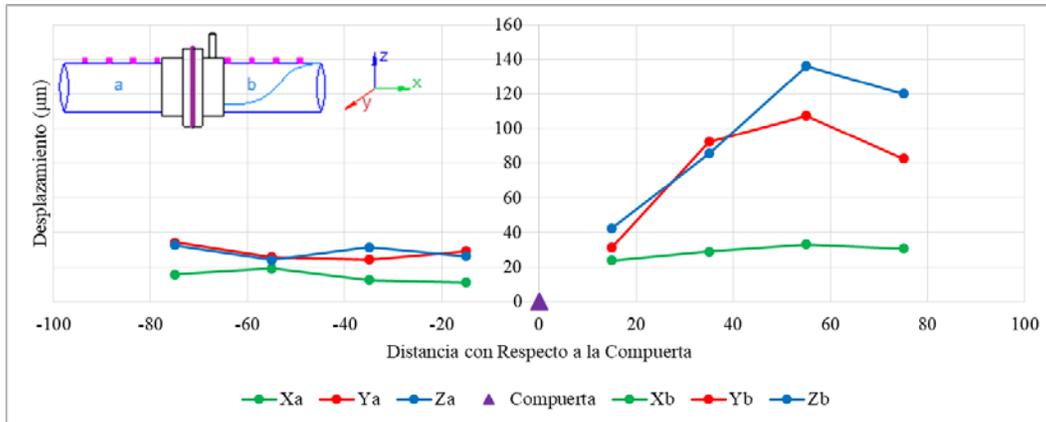


Figura 6.31. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36 \text{ l/s}$

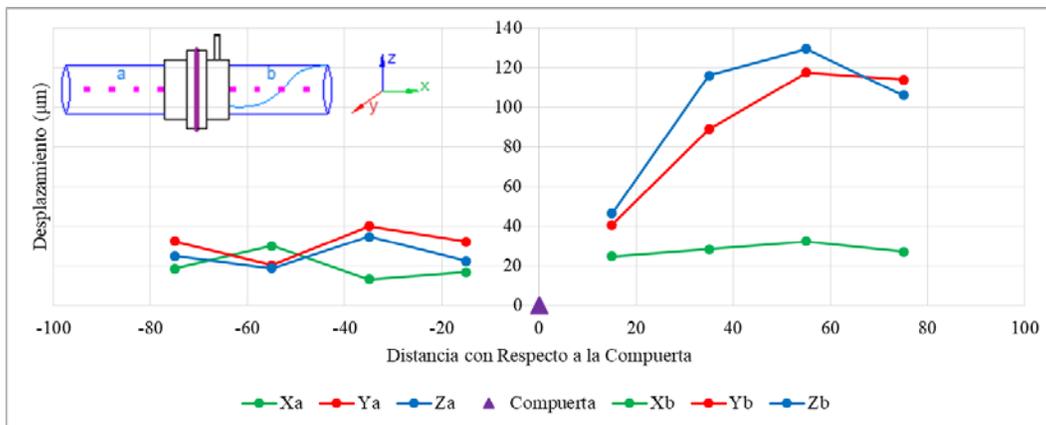


Figura 6.32. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36 \text{ l/s}$

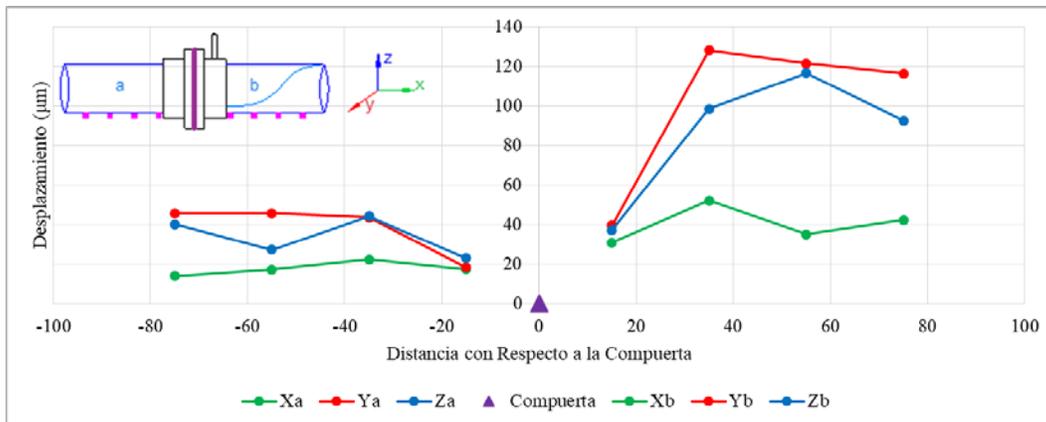


Figura 6.33. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36 \text{ l/s}$

6.2.3 Compuerta del 30% de apertura

La tabla 6.7 muestra los escenarios para la compuerta del 30% de apertura. En las figuras 6.34 y 6.35 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.36 a 6.38.

Compuerta	ω_{Bomba}	Gasto	Velocidad	SH-Inicio	SH-Long.	h	Fr	Venteo	
(% apertura)	(Hz)	(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(adim)	V _{aire} (m/s)	Q _{aire} (l/s)
30	20.00	21.42	2.20	0.40	0.70	0.06	2.92	5.12	2.59
	23.00	26.75	2.75	0.35	0.75	0.06	3.65	8.82	4.47
	26.10	31.13	3.20	0.35	0.80	0.06	4.24	9.53	4.83
	28.40	35.39	3.64	0.40	0.85	0.06	4.82	11.13	5.64
	32.20	40.23	4.14	0.45	0.85	0.06	5.48	14.34	7.27

Tabla 6.7. Escenarios para la compuerta del 30% de apertura, CSH

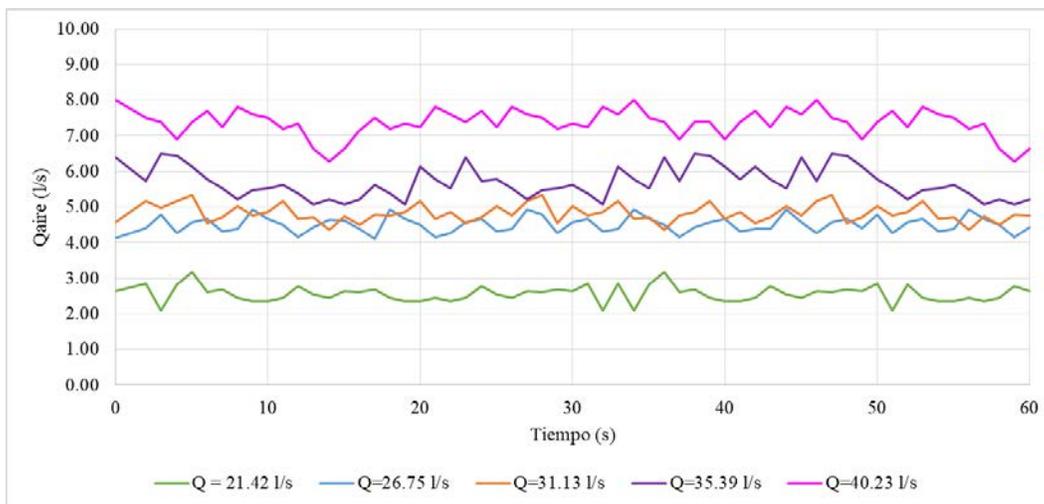


Figura 6.34. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 30% de apertura, CSH

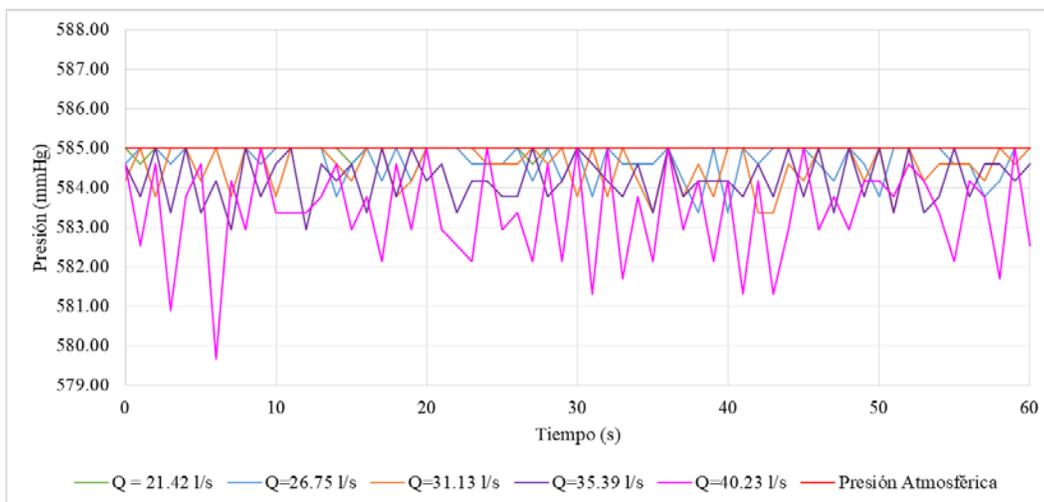


Figura 6.35. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 30% de apertura, CSH

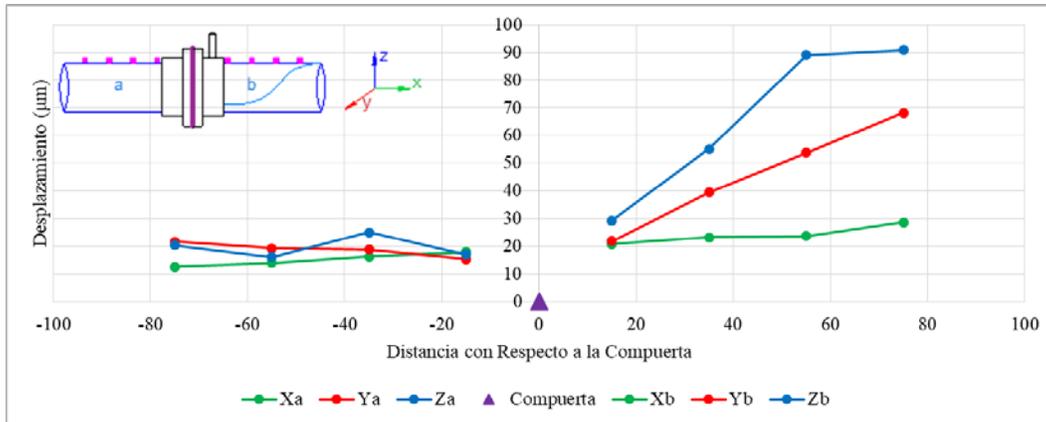


Figura 6.36. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23 \text{ l/s}$

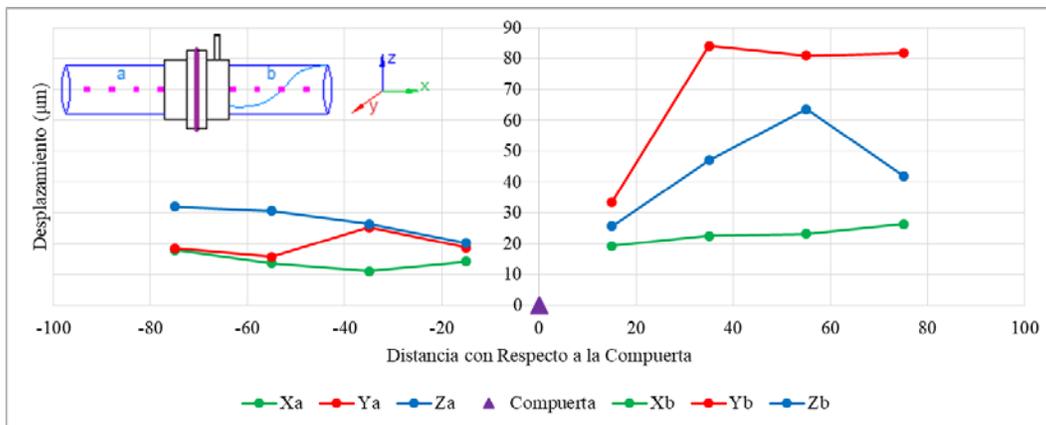


Figura 6.37. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23 \text{ l/s}$

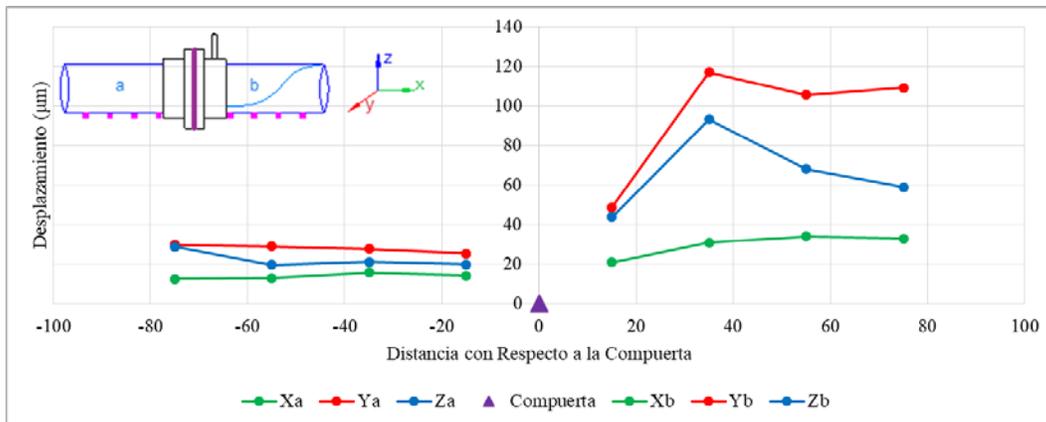


Figura 6.38. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23 \text{ l/s}$

6.2.4 Compuerta del 40% de apertura

La tabla 6.8 muestra los escenarios para la compuerta del 40% de apertura. Para obtener el gasto de 21.66 l/s, el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro fue del 70%, aproximadamente. En las figuras 6.39 y 6.40 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.41 a 6.43.

Compuerta	ω_{Bomba}	Gasto	Velocidad	SH-Inicio	SH-Long.	h	Fr	Venteo	
(% apertura)	(Hz)	(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(adim)	V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
40	20.00	21.66	1.67	0.25	0.60	0.07	1.96	3.04	1.54
	21.00	26.63	2.05	0.35	0.65	0.07	2.41	3.61	1.83
	23.80	31.20	2.41	0.45	0.65	0.07	2.82	5.07	2.57
	26.50	35.37	2.73	0.35	0.70	0.07	3.20	6.58	3.33
	29.90	40.26	3.10	0.55	0.75	0.07	3.64	8.94	4.53

Tabla 6.8. Escenarios para la compuerta del 40% de apertura, CSH

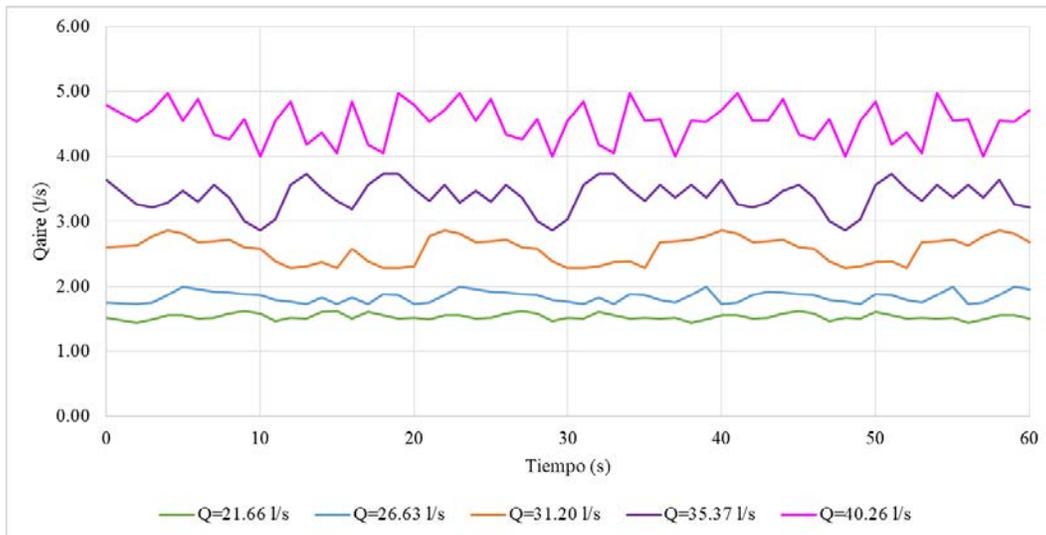


Figura 6.39. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 40% de apertura, CSH

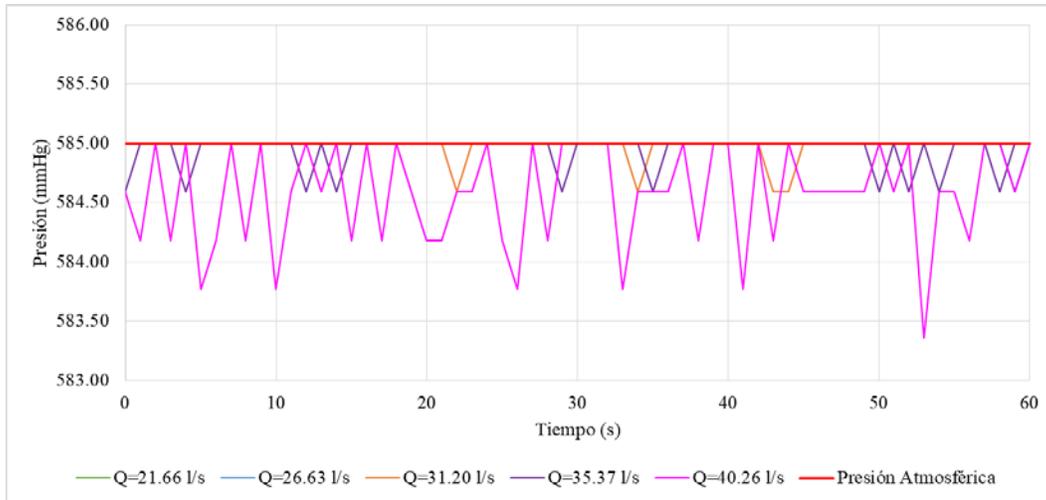


Figura 6.40. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 40% de apertura, CSH

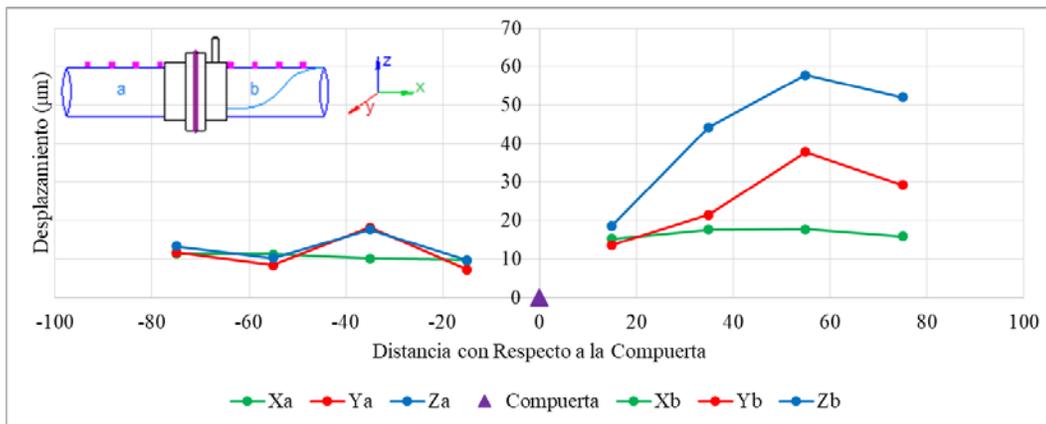


Figura 6.41. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26 \text{ l/s}$

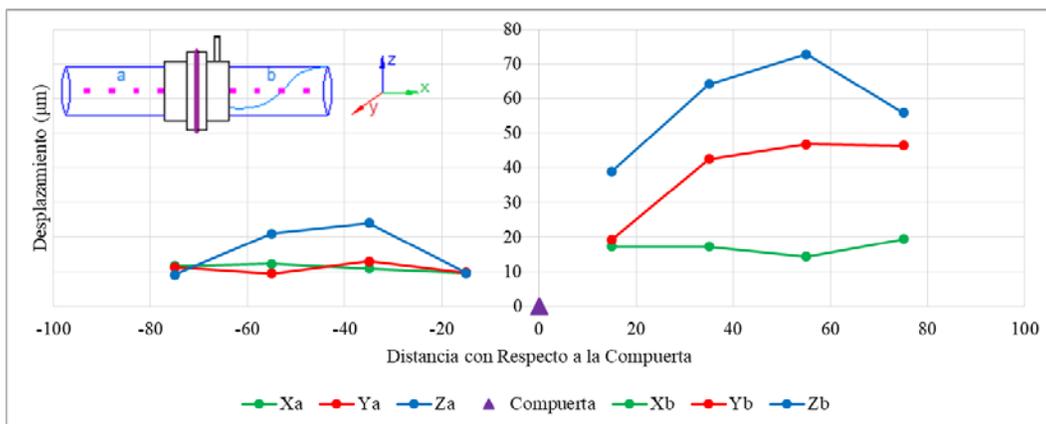


Figura 6.42. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26 \text{ l/s}$

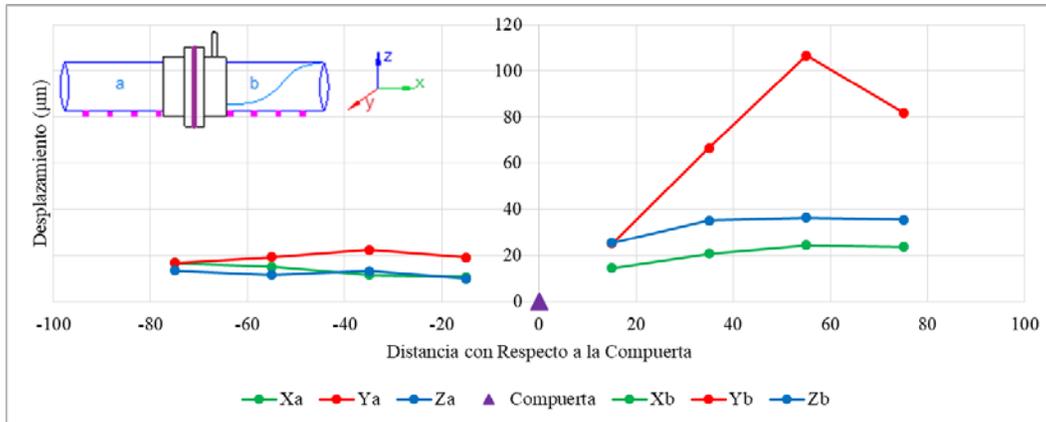


Figura 6.43. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26 \text{ l/s}$

6.2.5 Compuerta del 50% de apertura

La tabla 6.9 muestra los escenarios para la compuerta del 50% de apertura. Para obtener el gasto de 21.71 l/s , el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro fue del 67%, aproximadamente. En las figuras 6.44 y 6.45 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.46 a 6.48.

Compuerta	ω_{Bomba}	Gasto	Velocidad	SH-Inicio	SH-Long.	h	Fr	Venteo	
(% apertura)	(Hz)	(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(adim)	V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
50	20.00	21.71	1.34	parc. ahogado	0.45	0.09	1.45	0.95	0.48
	20.50	26.80	1.65	0.20	0.45	0.09	1.79	1.45	0.73
	23.00	31.19	1.92	0.20	0.60	0.09	2.08	2.60	1.32
	25.70	35.45	2.19	0.30	0.60	0.09	2.37	3.24	1.64
	29.00	40.73	2.51	0.20	0.60	0.09	2.72	4.79	2.43

Tabla 6.9. Escenarios para la compuerta del 50% de apertura, CSH

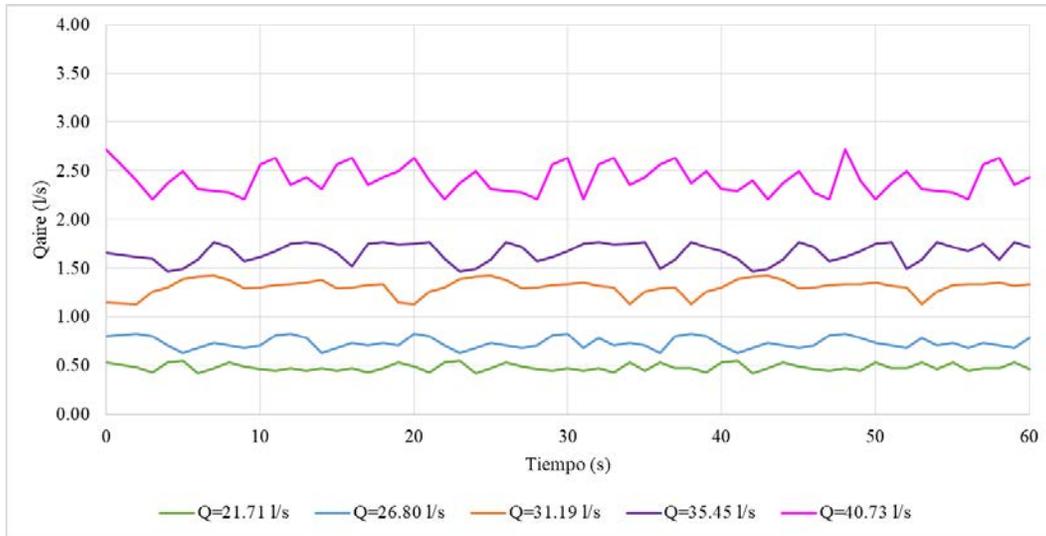


Figura 6.44. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 50% de apertura, CSH

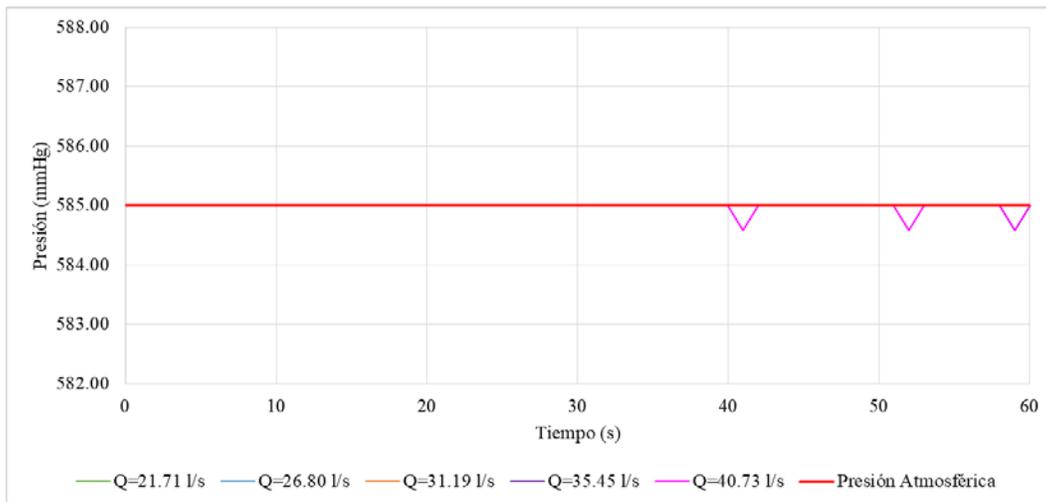


Figura 6.45. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 50% de apertura, CSH

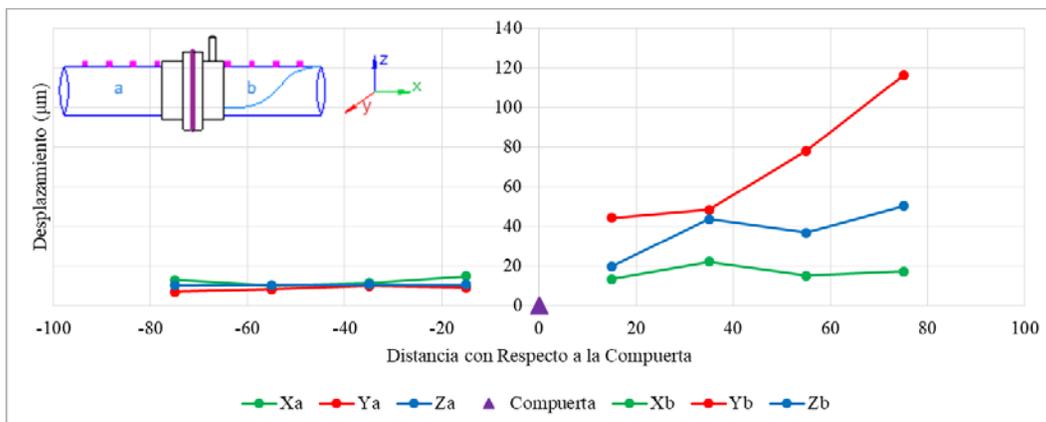


Figura 6.46. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73 \text{ l/s}$

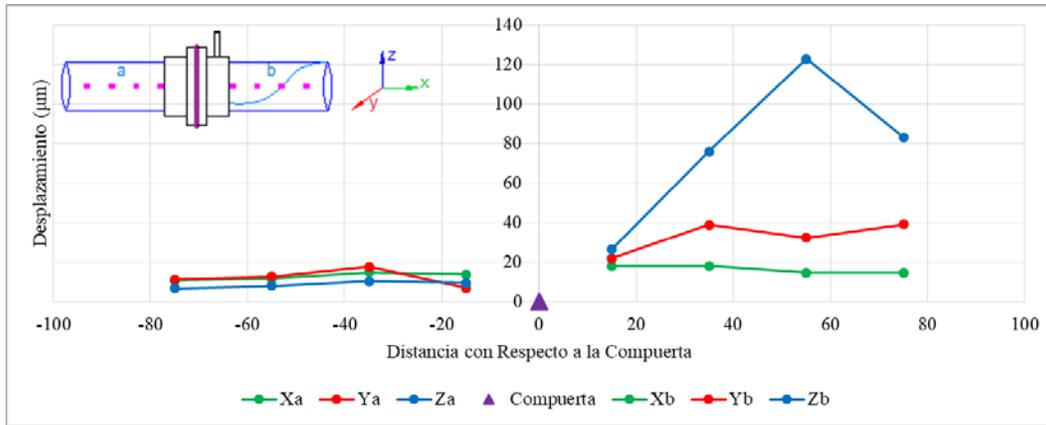


Figura 6.47. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73 \text{ l/s}$

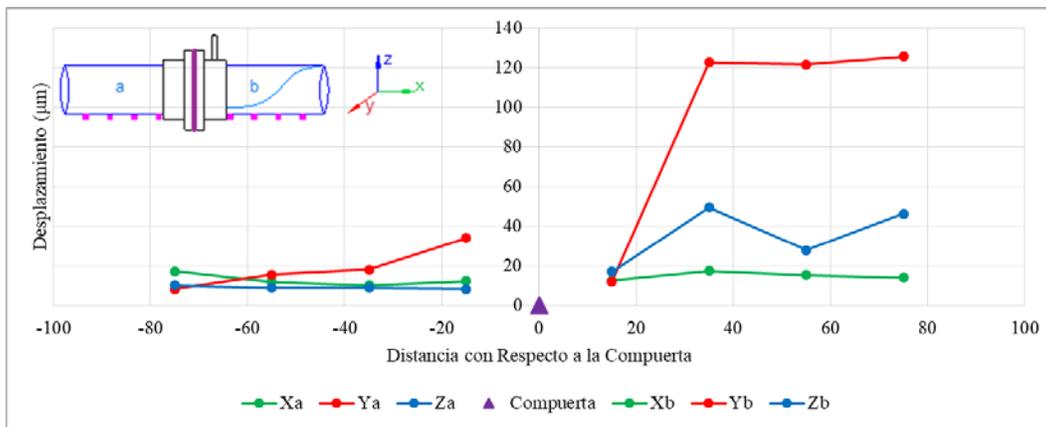


Figura 6.48. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73 \text{ l/s}$

6.2.6 Compuerta del 60% de apertura

La tabla 6.10 muestra los escenarios para la compuerta del 60% de apertura. Para obtener el gasto de 21.47 l/s , el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro fue del 64%, aproximadamente. En las figuras 6.49 y 6.50 se muestran el flujo de aire y la presión de operación en el venteo, respectivamente. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.51 a 6.53.

Compuerta	ω_{Bomba}	Gasto	Velocidad	SH-Inicio	SH-Long.	h	Fr	Venteo	
(% apertura)	(Hz)	(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(adim)	V_{aire} (m/s)	Q_{aire} (l/s)
60	20.00	21.47	1.10	parc. ahogado	0.40	0.11	1.04	0.00	0.00
	20.30	26.69	1.37	0.20	0.40	0.11	1.30	0.00	0.00
	22.70	31.16	1.60	0.20	0.45	0.11	1.51	0.40	0.20
	25.70	35.85	1.84	0.25	0.45	0.11	1.74	0.73	0.37
	28.80	40.70	2.09	0.25	0.50	0.11	1.98	2.95	1.49

Tabla 6.10. Escenarios para la compuerta del 60% de apertura, CSH

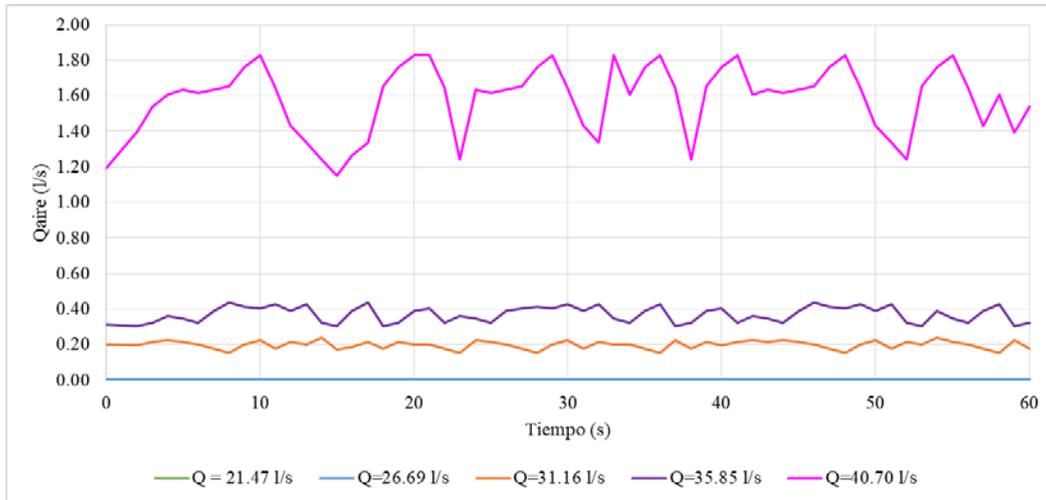


Figura 6.49. Flujo de aire en el venteo para la compuerta del 60% de apertura, CSH

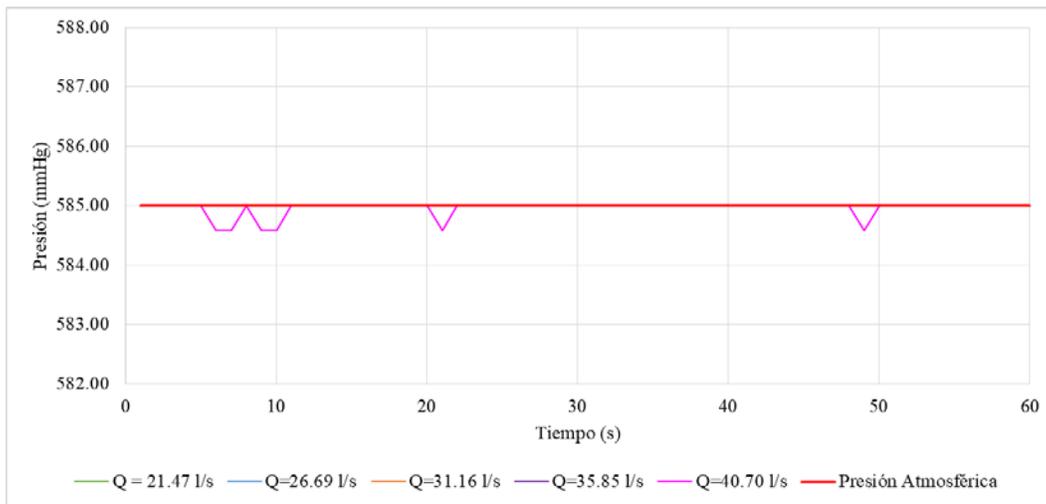


Figura 6.50. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 60% de apertura, CSH

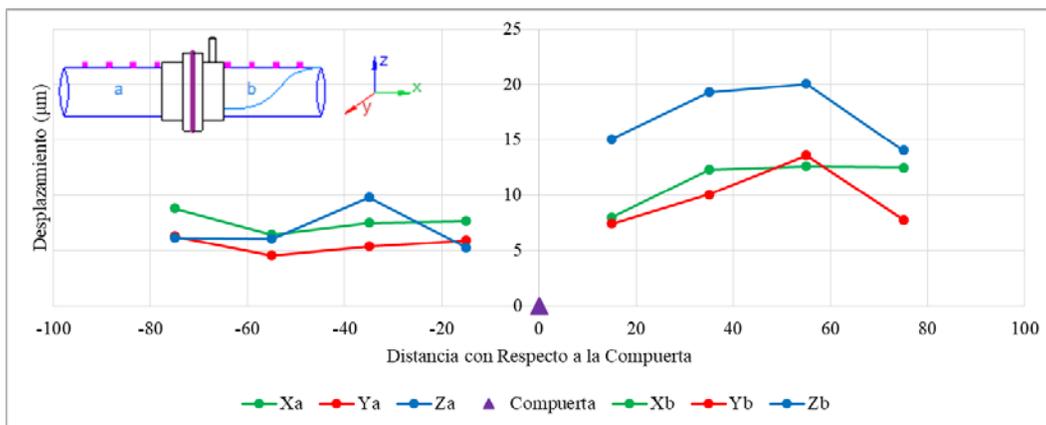


Figura 6.51. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

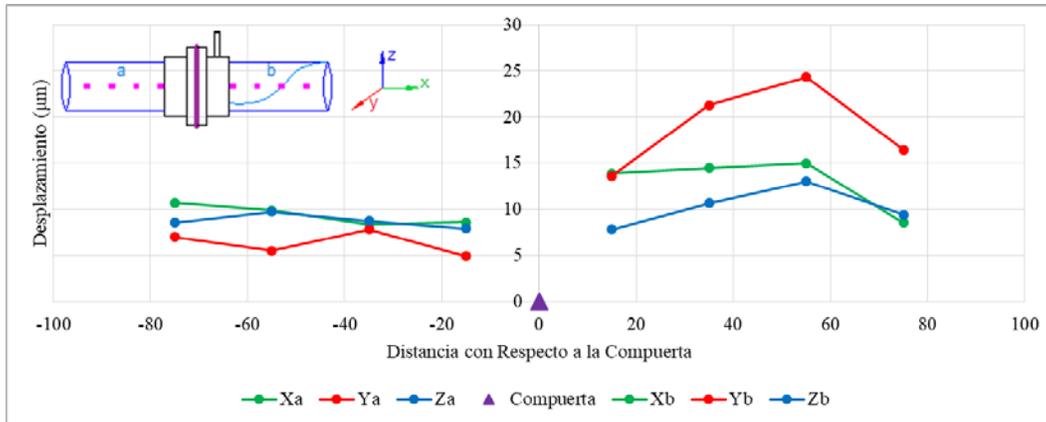


Figura 6.52. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

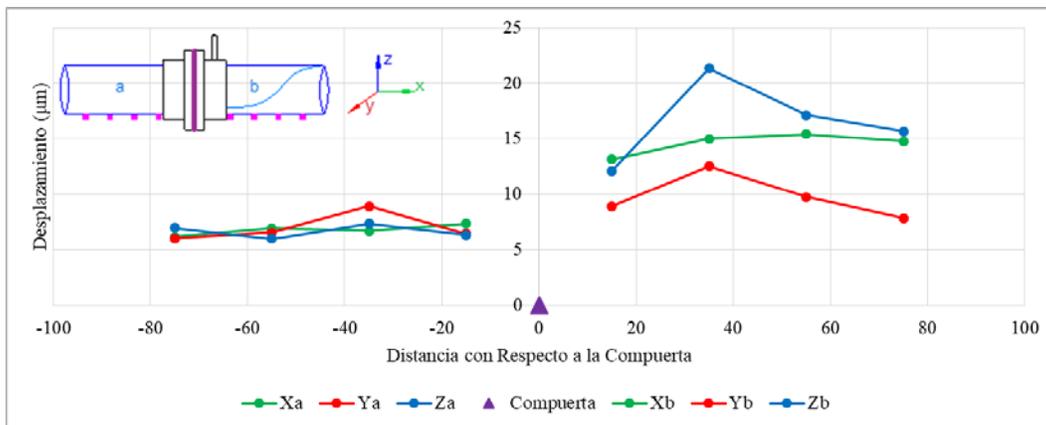


Figura 6.53. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

6.3 Escenarios sin dispositivo aireador o venteo (SV)

6.3.1 Compuerta del 10% de apertura

Los escenarios sin dispositivo aireador presentaron un salto hidráulico completamente ahogado aguas abajo de cada compuerta y caudal, por tanto no fue posible obtener factores hidráulicos como el tirante o número de Froude. En este escenario no existe flujo de aire por estar cerrada el venteo, pero si una demanda de aire reflejado en la caída de presión (subpresión) de operación del sistema. En la tabla 6.11 se muestran los escenarios para la compuerta del 10% de apertura que incluyeron el gasto y velocidad de flujo. La figura 6.54 muestra la presión de operación. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.55 a 6.57.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)
10	27.50	21.45	6.61
	33.20	26.47	8.16
	38.50	31.09	9.59
	43.50	35.30	10.89

Tabla 6.11. Escenarios para la compuerta del 10% de apertura, SV

Como ya se mencionó, el flujo de aire en el venteo no existe para este escenario, pero si el requerimiento de aireación por parte del sistema, reflejado directamente en la presión. En la figura 6.54 se muestra la caída de presión utilizando los caudales de la tabla 6.11 con respecto de la presión atmosférica.

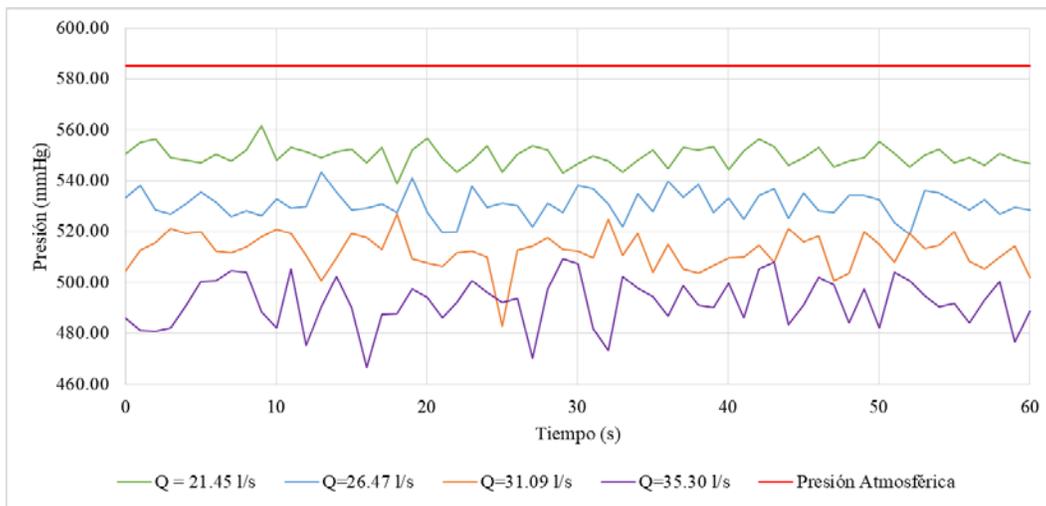


Figura 6.54. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 10% de apertura, SV

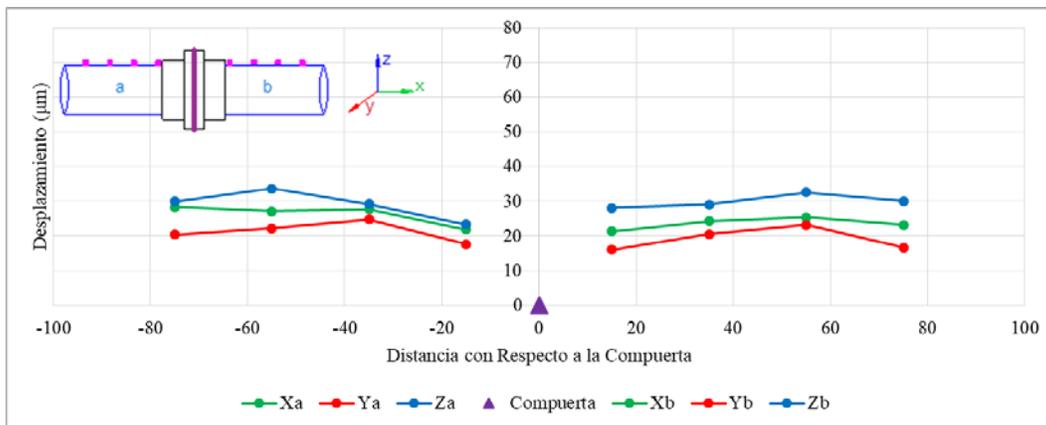


Figura 6.55. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, $Q = 35.30$ l/s

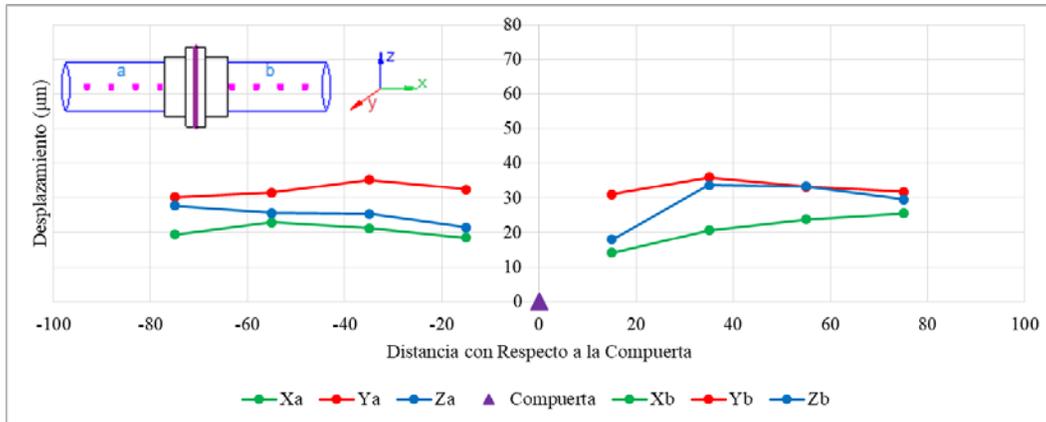


Figura 6.56. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, Q = 35.30 l/s

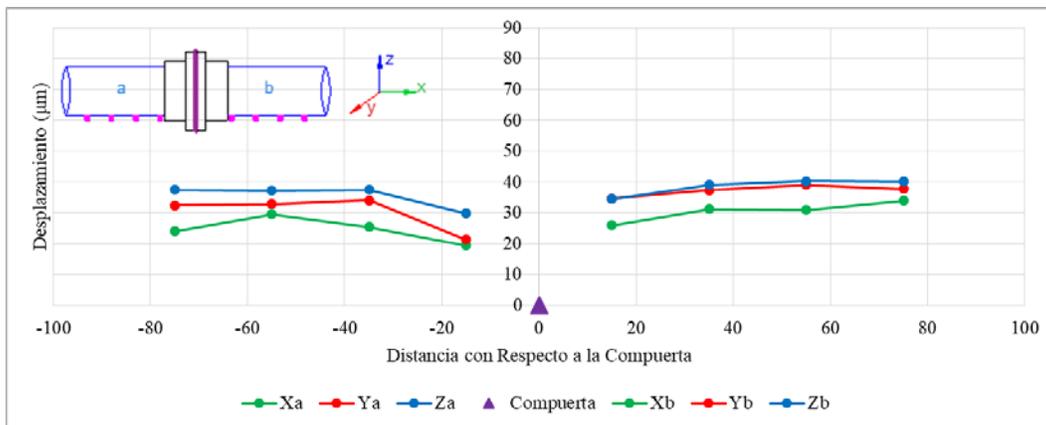


Figura 6.57. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, Q = 35.30 l/s

6.3.2 Compuerta del 20% de apertura

En la tabla 6.12 se muestran los escenarios para la compuerta del 20% de apertura. La figura 6.58 muestra la presión de operación. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.59 a 6.61.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)
20	20.80	21.18	3.27
	24.80	26.32	4.06
	28.70	31.49	4.86
	32.00	35.25	5.43
	36.20	40.70	6.28

Tabla 6.12. Escenarios para la compuerta del 20% de apertura, SV

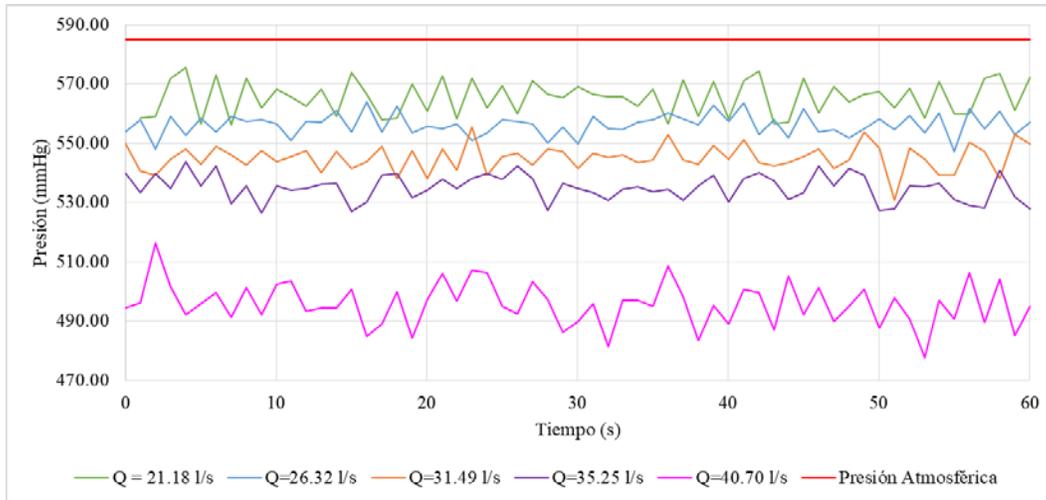


Figura 6.58. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 20% de apertura, SV

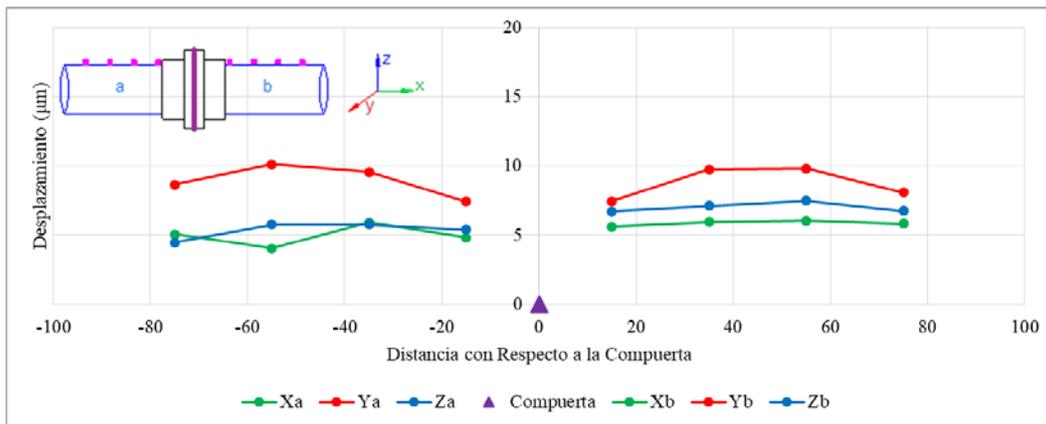


Figura 6.59. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

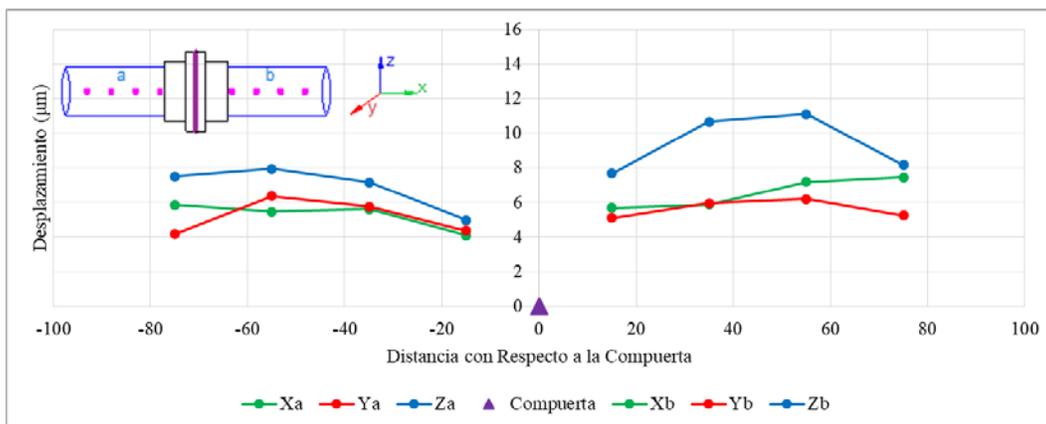


Figura 6.60. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

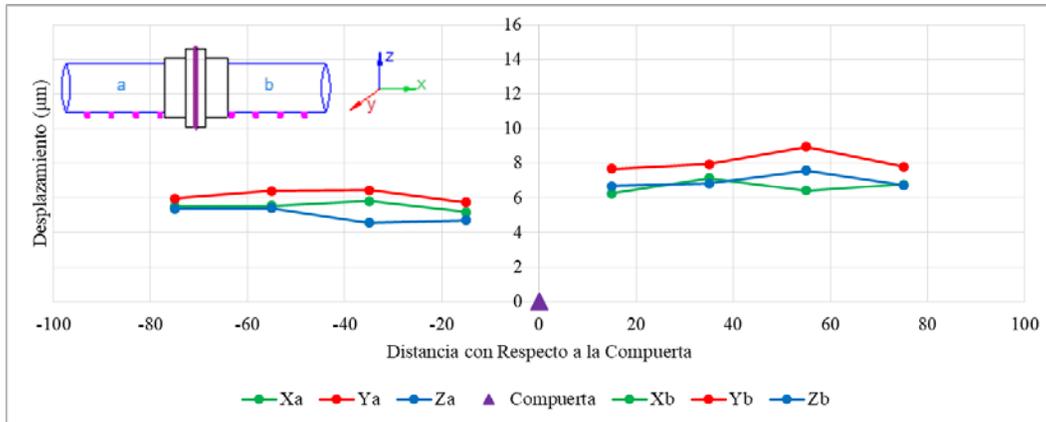


Figura 6.61. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

6.3.3 Compuerta del 30% de apertura

En la tabla 6.13 se muestran los escenarios para la compuerta del 30% de apertura. La figura 6.62 muestra la presión de operación. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.63 a 6.65.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)
30	20.00	21.28	2.19
	21.70	26.67	2.74
	25.20	31.51	3.24
	28.00	35.56	3.66
	31.00	40.34	4.15

Tabla 6.13. Escenarios para la compuerta del 30% de apertura, SV

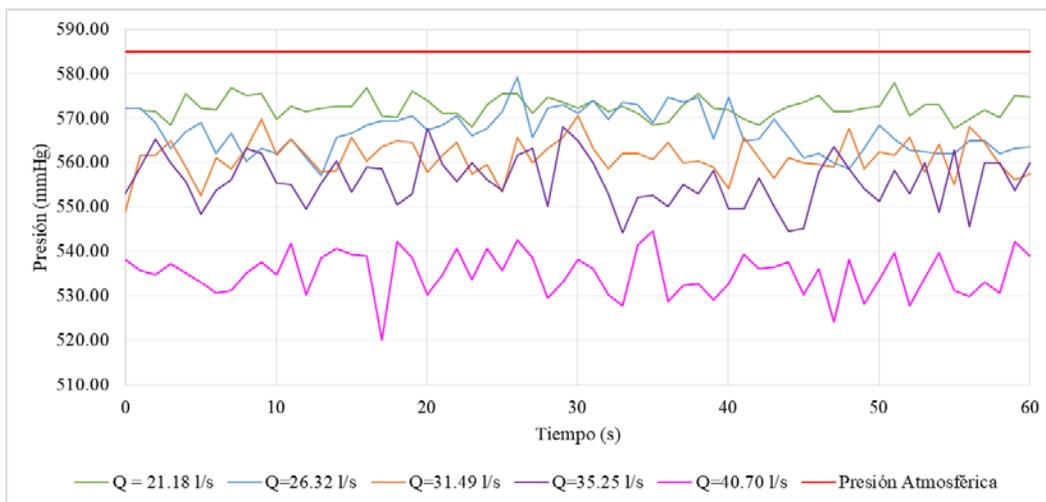


Figura 6.62. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 30% de apertura, SV

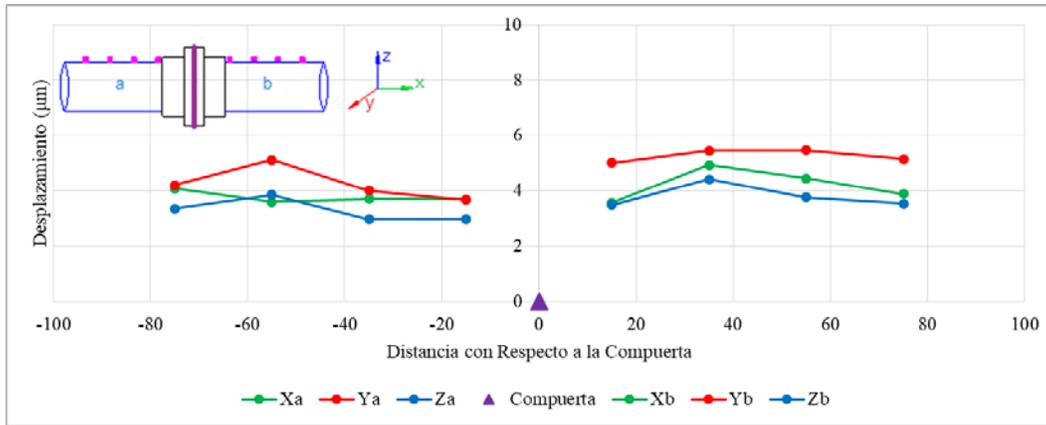


Figura 6.63. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, Q = 40.34 l/s

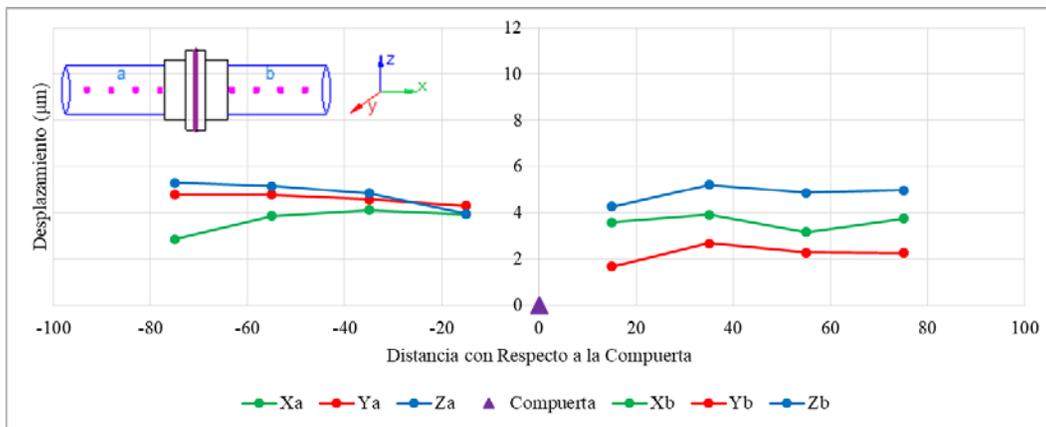


Figura 6.64. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, Q = 40.34 l/s

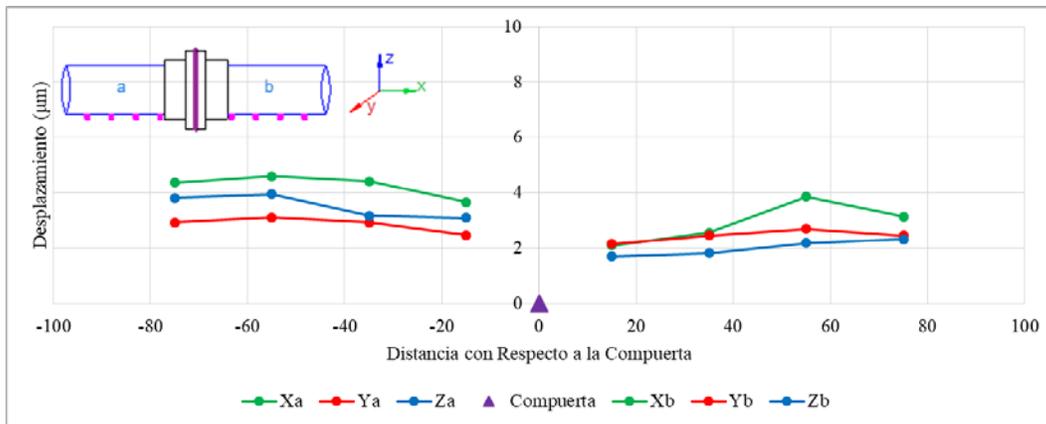


Figura 6.65. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, Q = 40.34 l/s

6.3.4 Compuerta del 40% de apertura

En la tabla 6.14 se muestran los escenarios para la compuerta del 40% de apertura. Para obtener el gasto de 21.59 l/s, el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro fue del 70%, aproximadamente. La figura 6.66 muestra la presión de operación. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.67 a 6.69.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)
40	20.00	21.59	1.66
	20.90	26.71	2.06
	23.80	31.54	2.43
	26.40	35.73	2.75
	29.30	40.53	3.12

Tabla 6.14. Escenarios para la compuerta del 40% de apertura, SV

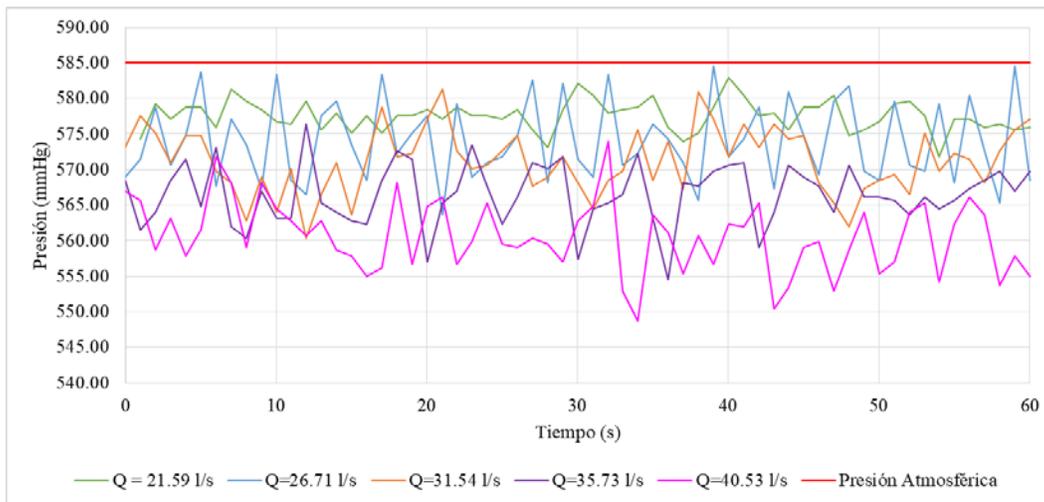


Figura 6.66. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 40% de apertura, SV

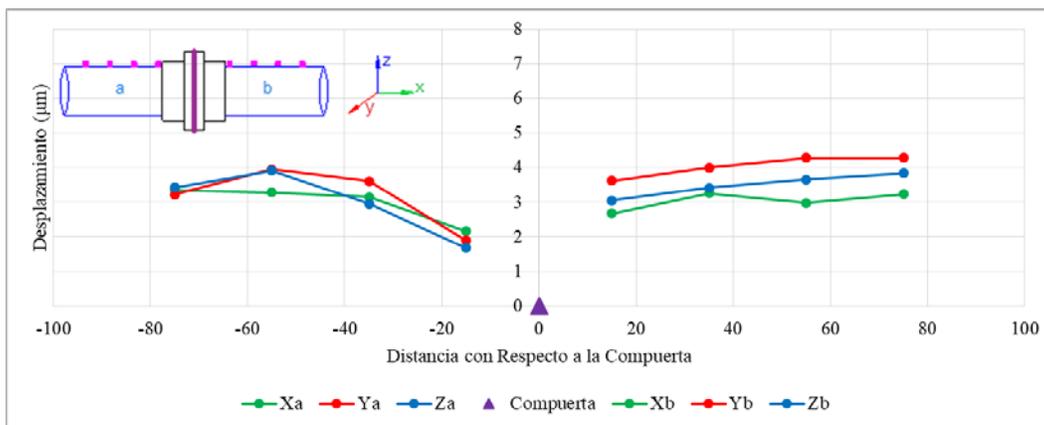


Figura 6.67. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, $Q = 40.53$ l/s

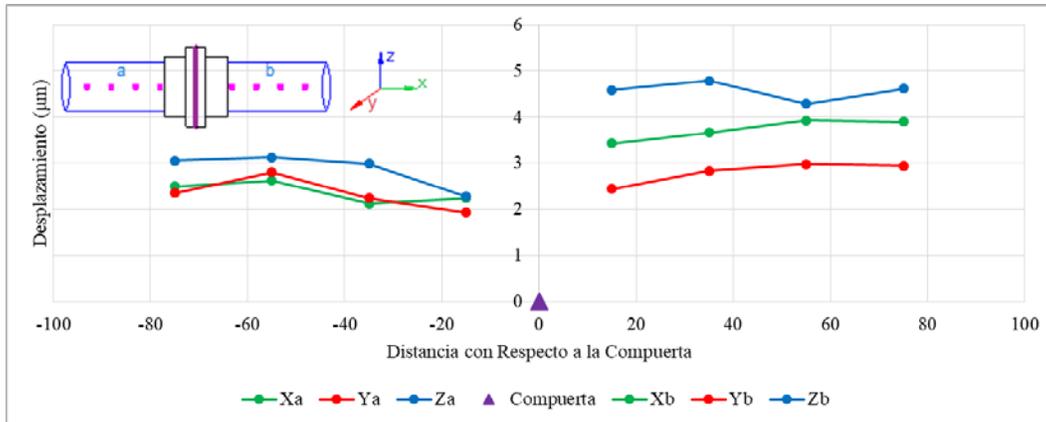


Figura 6.68. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, Q = 40.53 l/s

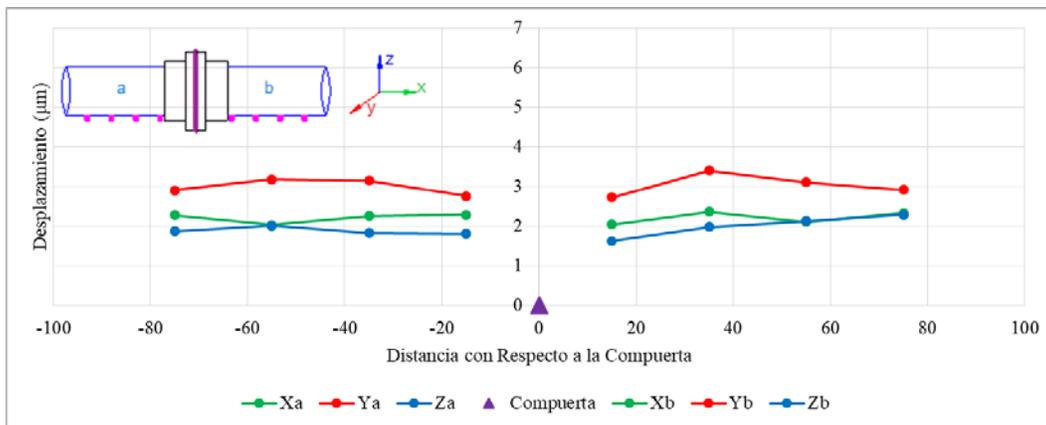


Figura 6.69. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, Q = 40.53 l/s

6.3.5 Compuerta del 50% de apertura

En la tabla 6.15 se muestran los escenarios para la compuerta del 50% de apertura. Para obtener el gasto de 21.73 l/s, el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro fue del 67%, aproximadamente. La figura 6.70 muestra la presión de operación. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.71 a 6.73.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)
50	20.00	21.73	1.34
	20.50	26.54	1.64
	23.50	31.49	1.94
	25.70	35.12	2.17
	28.70	40.68	2.51

Tabla 6.15. Escenarios para la compuerta del 50% de apertura, SV

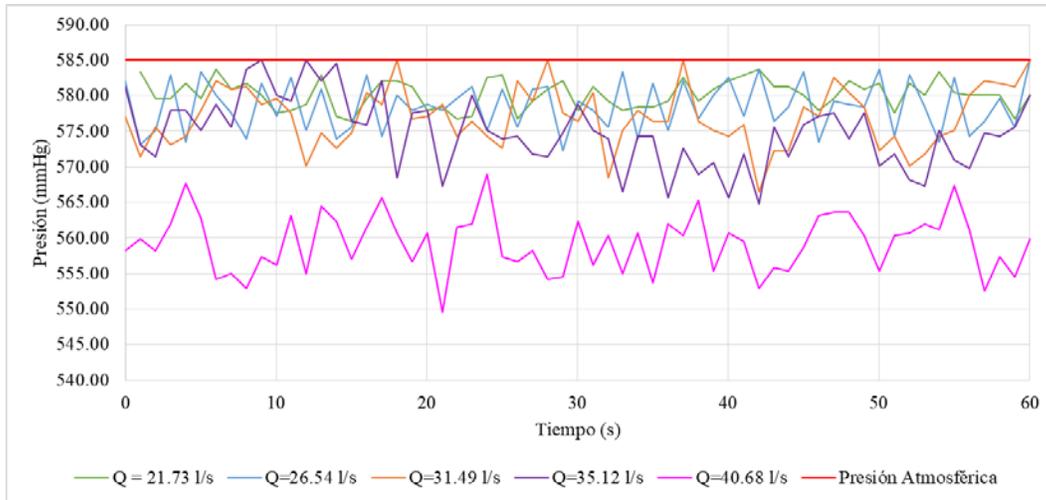


Figura 6.70. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 50% de apertura, SV

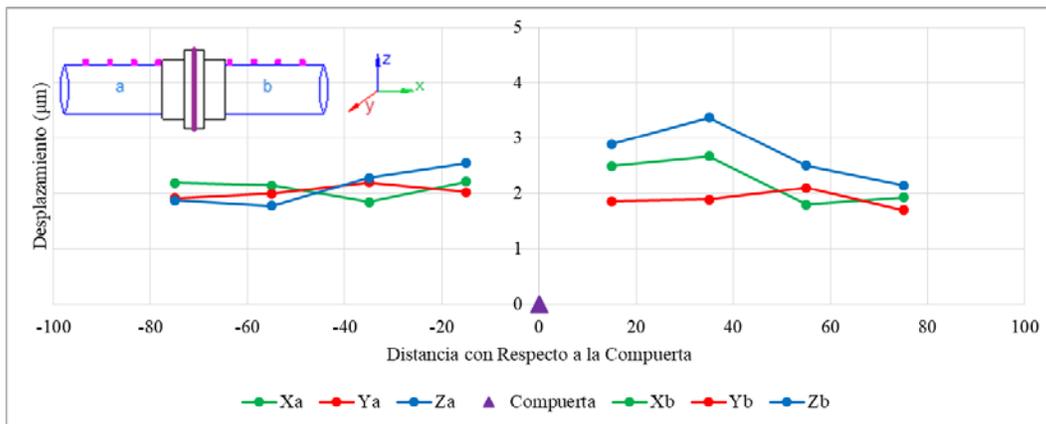


Figura 6.71. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, $Q = 40.68 \text{ l/s}$

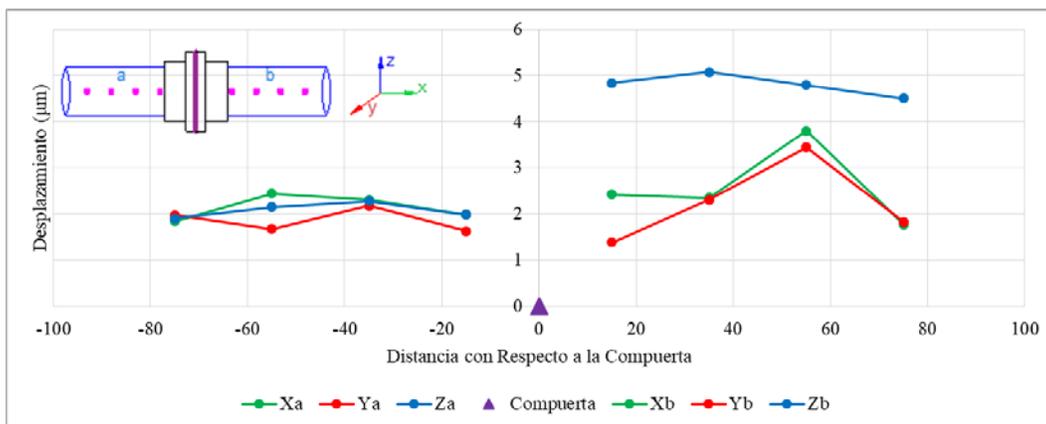


Figura 6.72. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, $Q = 40.68 \text{ l/s}$

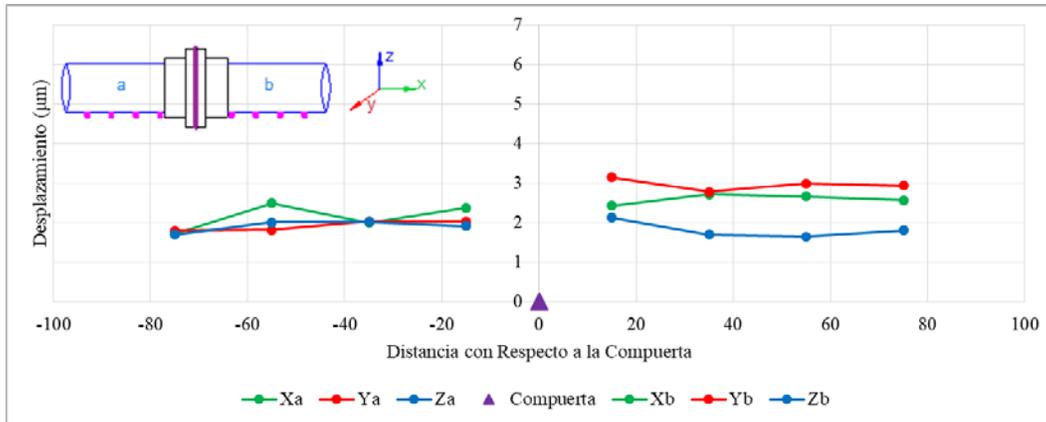


Figura 6.73. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta 50% del apertura, SV, Q = 40.68 l/s

6.3.6 Compuerta del 60% de apertura

En la tabla 6.16 se muestran los escenarios para la compuerta del 60% de apertura. Para obtener el gasto de 21.60 l/s, el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa de 15.24 cm de diámetro fue del 64%, aproximadamente. La figura 6.74 muestra la presión de operación. Los desplazamientos se muestran en las figuras 6.75 a 6.77.

Compuerta (% apertura)	ω_{Bomba} (Hz)	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)
60	20.00	21.60	1.11
	20.00	26.48	1.36
	23.00	31.43	1.62
	25.50	35.33	1.82
	28.10	40.51	2.08

Tabla 6.16. Escenarios para la compuerta del 60% de apertura, SV

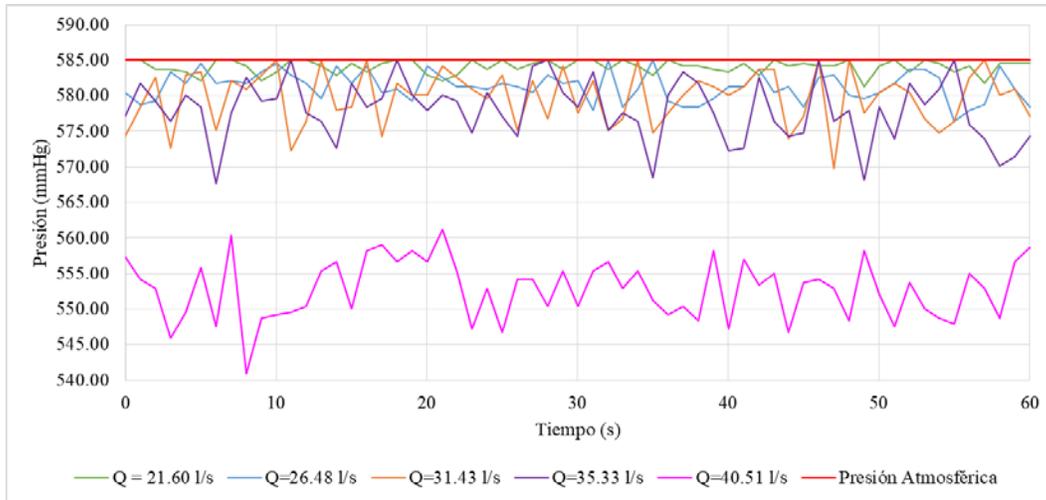


Figura 6.74. Presión de operación aguas abajo de la compuerta del 60% de apertura, SV

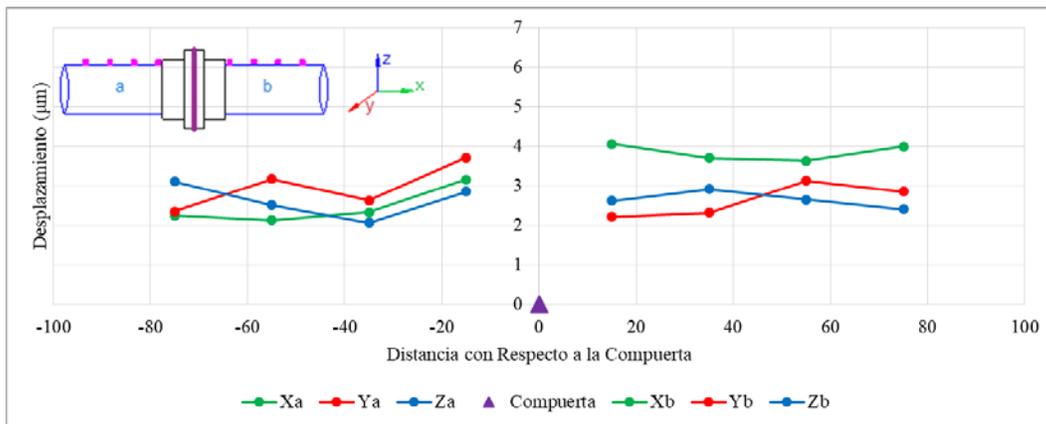


Figura 6.75. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s

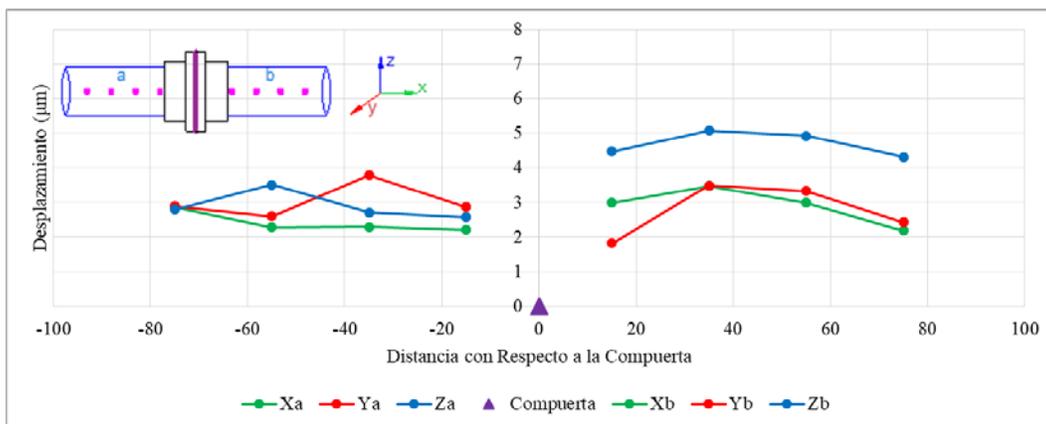


Figura 6.76. Desplazamientos máximos en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51$ l/s

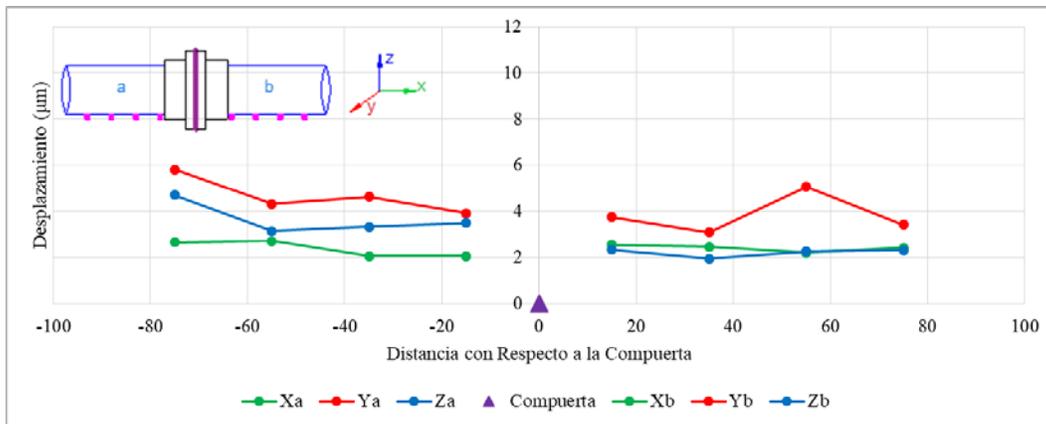


Figura 6.77. Desplazamientos máximos en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, $Q = 40.51 \text{ l/s}$

6.4 Análisis de resultados

6.4.1 Condición hidráulica: SSH, CSH y SV

Aireación

El flujo de aire dentro del venteo tuvo diferencias significativas al presentarse un salto hidráulico y el agua a superficie libre. En la figura 6.78 se muestra una gráfica utilizando la compuerta del 10% de apertura y comparando el comportamiento del flujo de aire en el venteo cuando se presenta un salto hidráulico (CSH) frente al caudal a superficie libre (SSH), esto se realiza utilizando los 2 gastos más grandes que son de 31 l/s y 35 l/s.

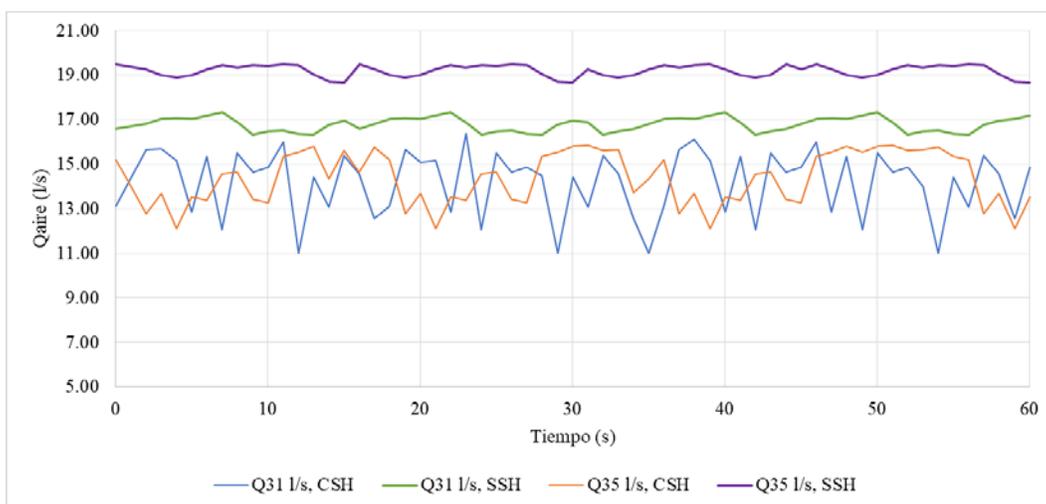


Figura 6.78. Comparación del flujo de aire en el venteo (CSH vs SSH) utilizando la compuerta del 10% de apertura

En la figura 6.78 se observa que el salto hidráulico demanda un mayor flujo de aire (Q_{aire}), cuando se incorpora aire al flujo desde el venteo el salto tiende a experimentar un corrimiento hacia aguas abajo, además cuando el salto expulsa aire hacia el extremo final de la tubería,

éste se corre hacia aguas arriba. Es importante mencionar que los corrimientos que experimentó el salto son de pocos centímetros. Por otra parte, se puede decir que cuando el tubo opera a flujo a superficie libre sin salto el aire que entra por el venteo y el que sale por el extremo aguas abajo del conducto es el mismo, debido a que las oscilaciones en el valor del gasto de aire es mínimo.

Presión

En la figura 6.79 se muestra una gráfica comparando el comportamiento de las presiones frente a las 3 condiciones hidráulicas, utilizando la compuerta del 10% de apertura, presentando únicamente los valores obtenidos con los gastos de 31 l/s y 35 l/s.

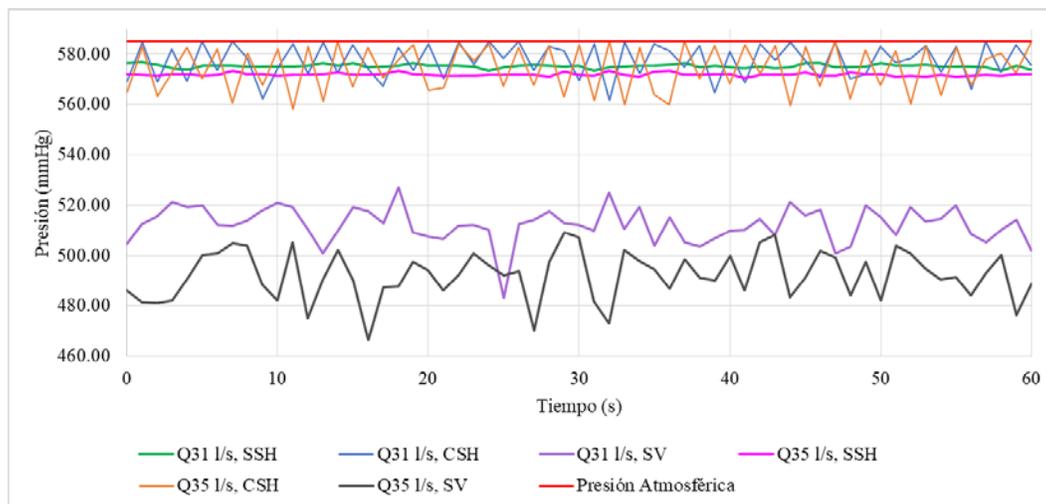


Figura 6.79. Comparación de la presión en el venteo (CSH, SSH y SV) utilizando la compuerta del 10% de apertura

En la figura 6.79 se observa un comportamiento prácticamente constante para las presiones con el flujo de agua a superficie libre, reflejo de la estabilidad del mismo flujo. Para el caso de un salto hidráulico, dichas presiones presentan oscilaciones, un comportamiento muy similar al que tiene el flujo de aire. Nuevamente este comportamiento de la presión refleja que el salto hidráulico no se mantuvo estable sino oscilante. Por su parte, las presiones sufren una caída considerablemente grande cuando no existe un dispositivo de aireación, esto se debe a que un venteo introduce aire cuando disminuye la presión aguas abajo de una compuerta parcialmente cerrada.

Desplazamientos

Para el análisis de los desplazamientos es conveniente compararlos según su condición hidráulica (SSH, CSH y SV). En la figura 6.80 se muestra una gráfica en la cual se comparan los desplazamientos máximos ocurridos en la parte superior del conducto bajo las tres condiciones hidráulica, con la compuerta del 10% y el gasto máximo que fue de 35 l/s aproximadamente. La nomenclatura “Xacsh” indica la dirección de desplazamiento en “x”

(tonos verdes), “a” aguas arriba y la condición con salto hidráulico CSH, por su parte “Yassh” indica la dirección de desplazamiento en sentido “y” (tonos rojos), “a” aguas arriba, sin salto hidráulico SSH y “Zbsv” indica la dirección de desplazamiento en “z” (tonos azules), “b” aguas abajo, sin venteo SV.

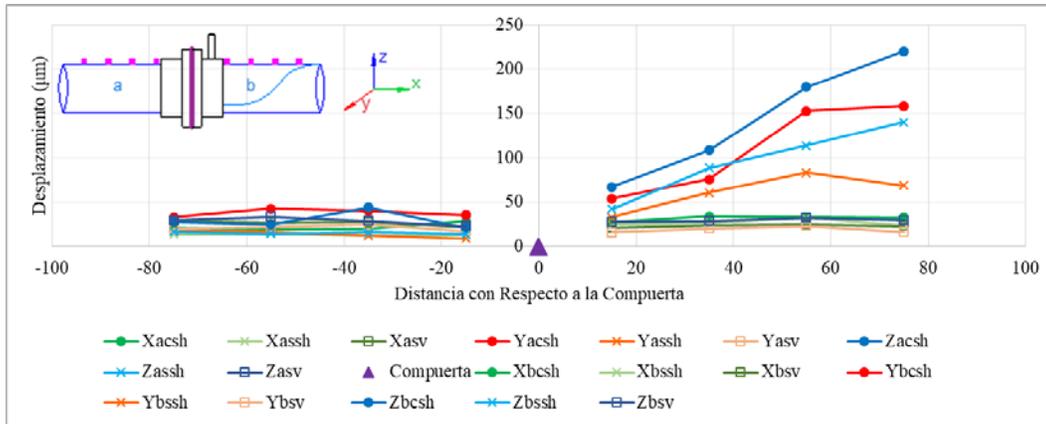


Figura 6.80. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 10% de apertura y el gasto máximo

Para las compuertas del 20% al 60% de apertura, el gasto máximo manejado fue de 40 l/s aproximadamente. En las figuras 6.81 a 6.85 se muestran los desplazamientos utilizando dicho caudal.

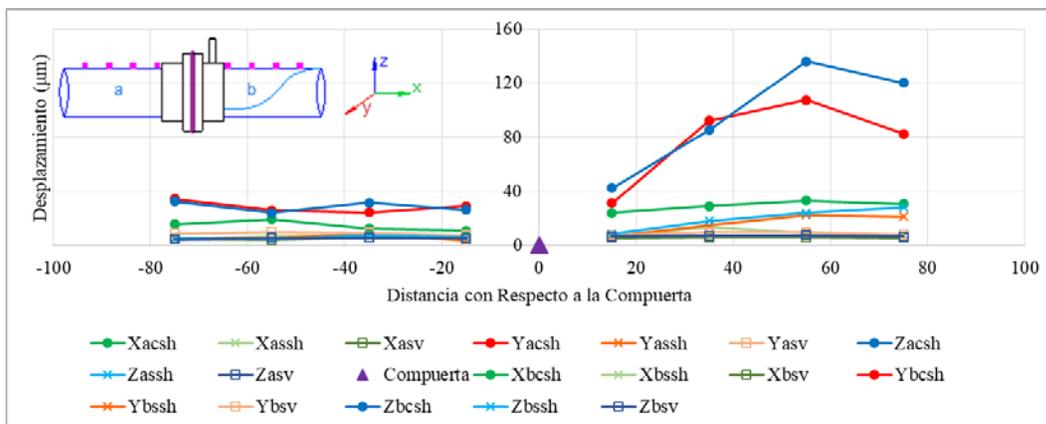


Figura 6.81. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 20% de apertura y el gasto máximo

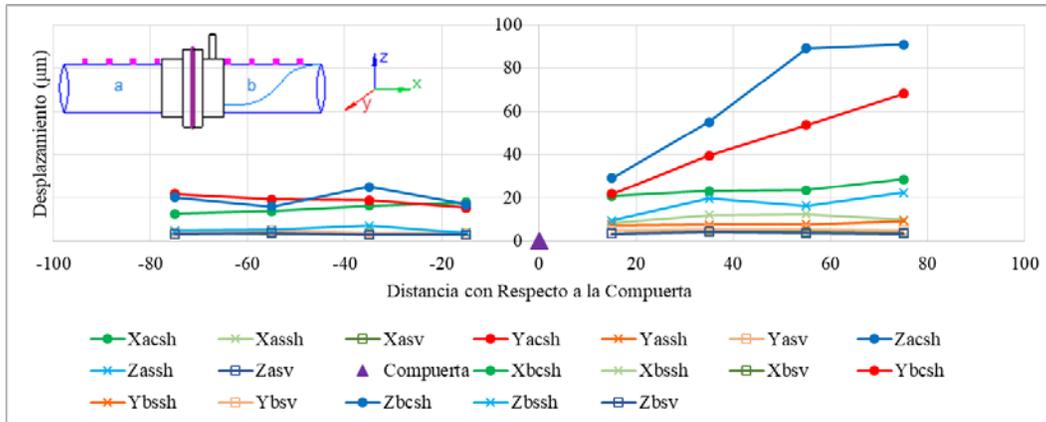


Figura 6.82. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 30% de apertura y el gasto máximo

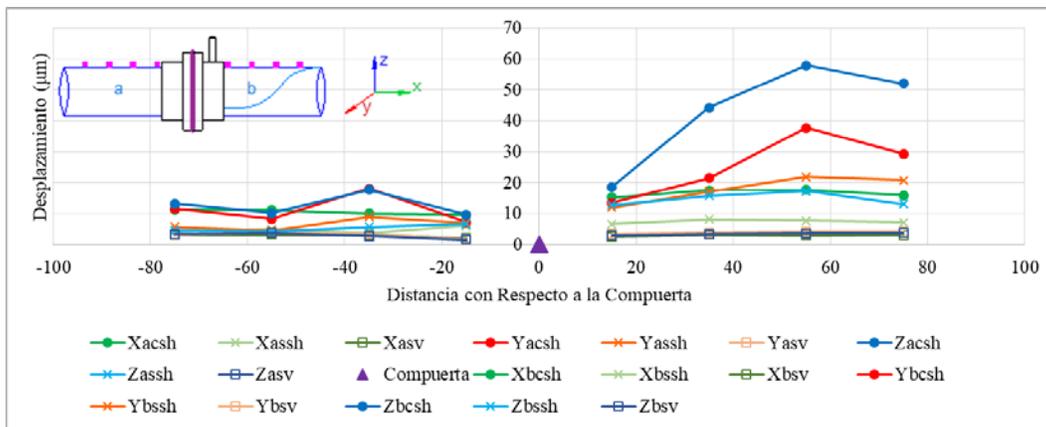


Figura 6.83. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las tres condiciones SSH, CSH y SV, con la compuerta del 40% de apertura y el gasto máximo

Para el caso de las compuertas del 50% y 60% no fue posible que el sistema trabajara a superficie libre aguas abajo de la compuerta, por lo que sólo se muestran las condiciones con salto hidráulico y sin venteo (salto hidráulico completamente ahogado).

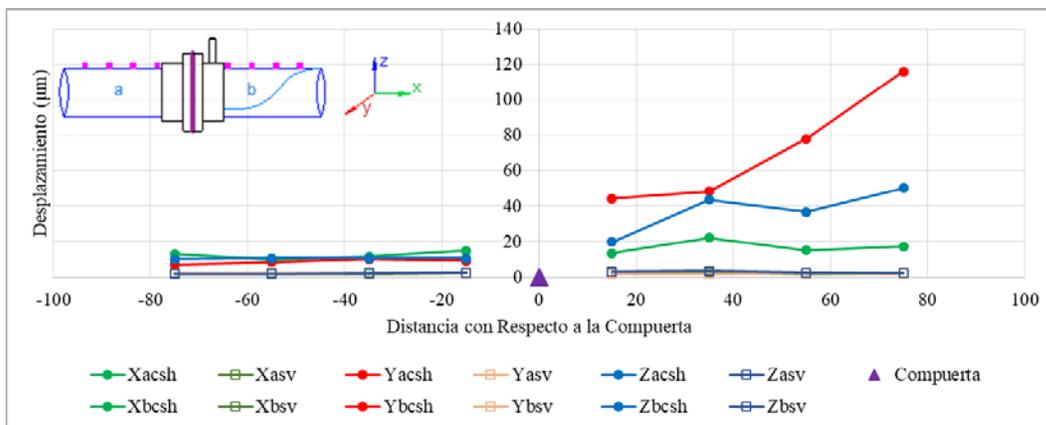


Figura 6.84. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las dos condiciones CSH y SV, con la compuerta del 50% de apertura y el gasto máximo

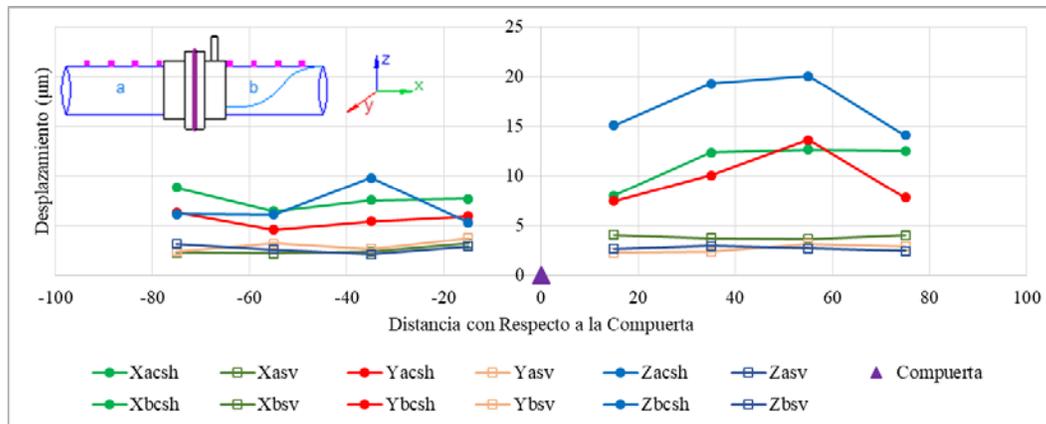


Figura 6.85. Desplazamientos máximos en la parte superior del conducto para las dos condiciones CSH y SV, con la compuerta del 60% de apertura y el gasto máximo

En las figuras 6.81 a 6.85 se aprecia que los desplazamientos máximos en la tubería son generados por el salto hidráulico, debido a la abrupta transición de flujo a superficie libre a flujo presurizado en el conducto. Este fenómeno consiste en una elevación brusca de la superficie del agua que impacta el techo del tubo (transición del régimen supercrítico al subcrítico), lo que genera una disipación importante de energía. Por otra parte, los desplazamientos fueron menores cuando en la tubería se presentó flujo a superficie libre. Finalmente, los desplazamientos mínimos se presentaron cuando no operó el venteo y se formó un salto ahogado en todas las pruebas. Por lo anterior, podemos decir que para este estudio en particular el escenario más perjudicial fue cuando ocurrió un salto hidráulico.

6.4.2 Comparación de los desplazamientos en el conducto con salto hidráulico

Anteriormente se observó que la condición más perjudicial es cuando existe un salto hidráulico en el conducto, por ello en las siguientes gráficas se muestran los desplazamientos máximos con dicha condición hidráulica, obtenidos en la parte superior, media e inferior de la tubería.

Los desplazamientos obtenidos tuvieron variaciones, las cuales pueden observarse en la figura 6.86, que representa la comparación de los desplazamientos máximos entre la parte superior, media e inferior de la tubería con presencia de un salto hidráulico (CSH). Esta figura corresponde a la compuerta del 10% de apertura utilizando el gasto máximo de 35 l/s. En este caso la nomenclatura “Xas” indica el desplazamiento en dirección “x”, “a” indica aguas arriba y “s” se refiere a la parte superior del conducto. En el mismo sentido “Ybm” indica el desplazamiento en dirección “y”, “b” indica aguas abajo de la compuerta y “m” es la parte media del tubo. “Zai” representa el desplazamiento en “z” e “i” se refiere a la parte inferior de la conducción. Así mismo, en las figuras 6.87 a 6.91 se muestra la misma comparación para las compuertas del 20% al 60% de apertura con un caudal de 40 l/s.

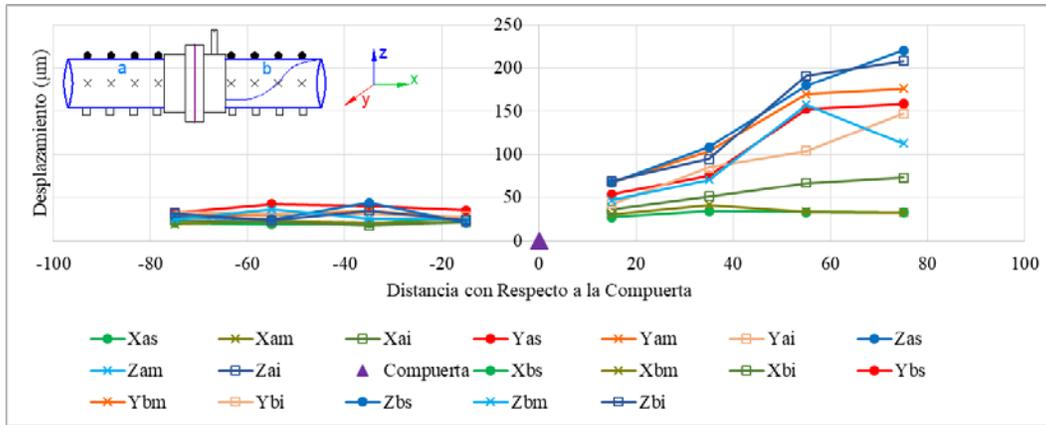


Figura 6.86. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 10% apertura, CSH, $Q = 35$ l/s

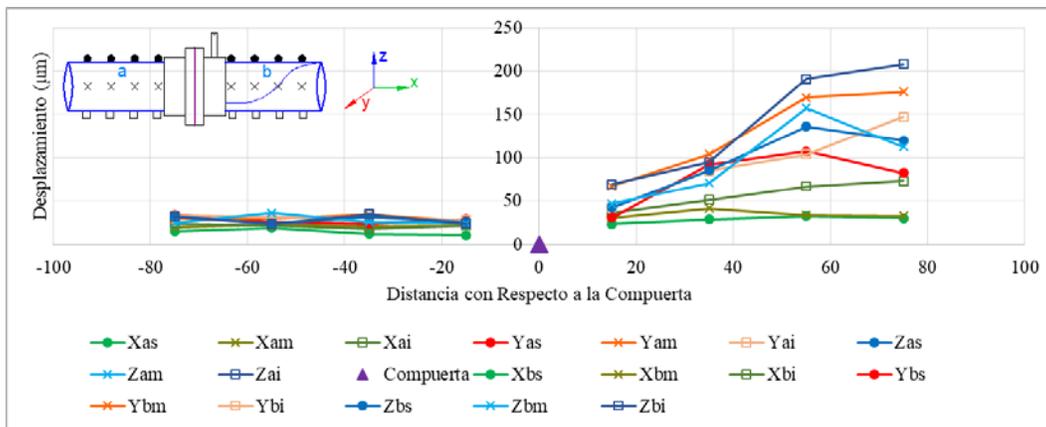


Figura 6.87. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 20% apertura, CSH, $Q = 40$ l/s

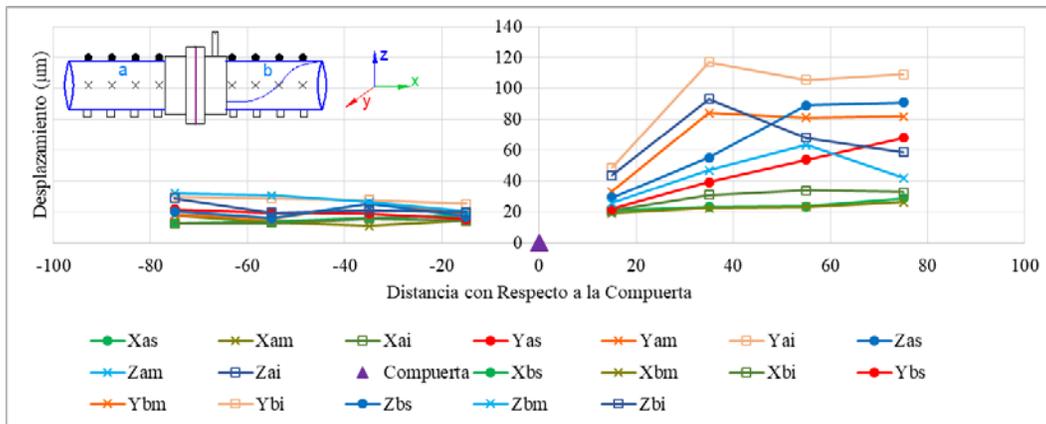


Figura 6.88. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 30% apertura, CSH, $Q = 40$ l/s

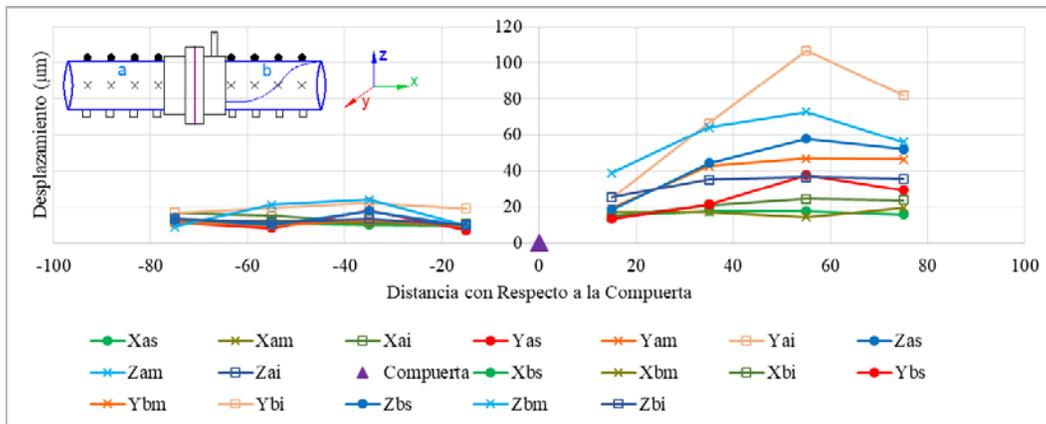


Figura 6.89. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 40% apertura, CSH, $Q = 40 \text{ l/s}$

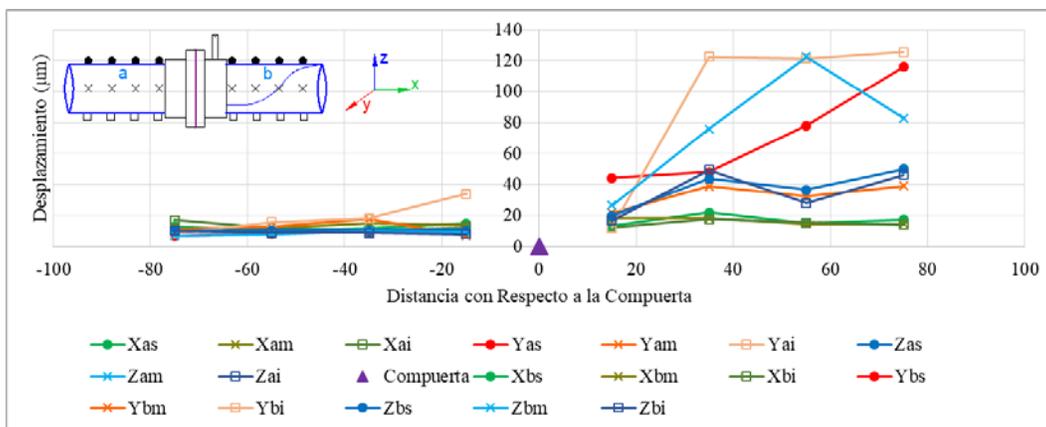


Figura 6.90. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 50% apertura, CSH, $Q = 40 \text{ l/s}$

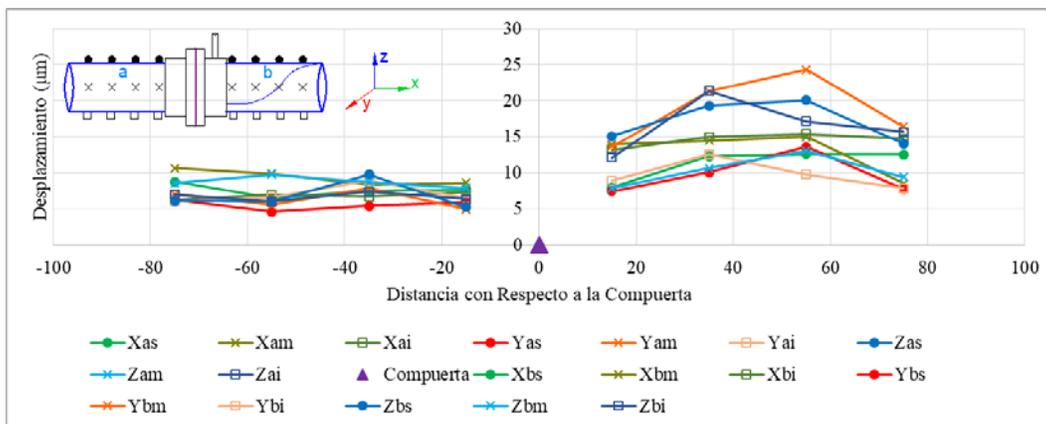


Figura 6.91. Desplazamientos máximos en la parte superior, media e inferior del conducto con la compuerta del 60% apertura, CSH, $Q = 40 \text{ l/s}$

Como puede observarse en las figuras 6.86 a 6.91, los desplazamientos varían según la ubicación de los sensores en el tubo, es decir, los conductos circulares tienen un comportamiento diferente con respecto a su circunferencia. También se observa que los

desplazamientos en “y” y “z” son de mayor magnitud que los obtenidos en “x” y que los desplazamientos en general son mayores aguas abajo de la compuerta comparados con los registrados aguas arriba, esto se debe evidentemente a la presencia del salto hidráulico aguas abajo de la compuerta. Además se puede apreciar que los desplazamientos fueron de mayor magnitud mientras más lejos de la compuerta se registraban, esto se debe a que los saltos hidráulicos iniciaban varios centímetros aguas debajo de la compuerta.

En el caso de las compuertas del 10% y 20% de apertura (figuras 6.86 y 6.87) los desplazamientos máximos se concentraban en la parte media del conducto en dirección “y” “Y_{bm}”, así como en la parte superior e inferior del tubo en la dirección “z” “Z_{bs}” y “Z_{bi}”. En el mismo sentido, para las compuertas del 30% y 40% (figuras 6.88 y 6.89) los desplazamientos máximos ocurrieron en la parte inferior de la tubería en el sentido “y” “Y_{bi}”.

Por su parte, la compuerta del 50% (figura 6.90) presenta desplazamientos importantes puntualmente en la parte superior e inferior en dirección “y” “Y_{bs}” y “Y_{bi}”, así mismo, los desplazamientos en la parte media tienen mayor presencia en el sentido “z” “Z_{bm}”.

En el caso de la compuerta del 60% de apertura (figura 6.91), se observa que los desplazamientos más grandes se generaron en la parte media en sentido “y” “Y_{bm}” y en la parte superior e inferior en sentido “z” “Z_{bs}” y “Z_{bi}”.

Con lo anterior se puede observar, de forma general, que las zonas más vulnerables de un conducto con esta geometría, sometido a las condiciones hidráulicas mencionadas son la parte superior e inferior en sentido “z” y en la parte media en sentido “y”. Con respecto a los desplazamientos en dirección “x” tienen una presencia importante si se analizan de manera independiente, ya que al utilizar la compuerta del 10% de apertura presentaron magnitudes mayores incluso que todos los desplazamientos presentados con la compuerta del 60% de apertura.

7 Conclusiones y recomendaciones

En los resultados obtenidos durante la investigación experimental se observó que el flujo agua-aire y las presiones aguas abajo de una compuerta parcialmente abierta producen desplazamientos, que son provocados por las vibraciones en un conducto circular que representa un desfogue de fondo de una presa. La aireación en este sistema permitió generar dos condiciones hidráulicas: flujo a superficie libre a todo lo largo del conducto y salto hidráulico que sella el conducto aguas debajo de la compuerta.

Otro resultado interesante fue que los desplazamientos aguas abajo de las compuertas aumentan conforme aumenta el gasto y éstos tienden a incrementarse de forma importante con la disminución del porcentaje de apertura de la compuerta. Los desplazamientos provocados por el flujo de agua-aire bajo las condiciones hidráulicas estudiadas en el conducto circular no son los mismos en toda su circunferencia, además de que éstos pueden orientarse en uno u otro sentido. Los desplazamientos de mayor magnitud en esta estructura hidráulica se registraron cuando se presentó un salto hidráulico que en todo momento estaba en contacto con la parte superior de la tubería, y éstos se concentraron en la parte media de la conducción en la dirección “y” y en la parte superior e inferior de la tubería en la dirección “z”.

En el mismo sentido, cuando el conducto operó con flujo a superficie libre desde la compuerta hasta el extremo final de la tubería, los desplazamientos fueron de menor magnitud, que aquellos registrados cuando ocurrió un salto hidráulico. Finalmente, los desplazamientos mínimos se presentaron cuando no operó el venteo y se formó un salto ahogado en todas las pruebas. Por lo anterior, podemos decir que para esta investigación en particular el escenario más perjudicial ocurrió al formarse un salto hidráulico que impacta constantemente el techo del conducto; lo cual no es deseable debido a que dichos impactos se ven reflejados directamente en desplazamientos de la tubería, y éstos a su vez afectan la estabilidad estructural del conducto.

En cuanto a la demanda de aire a través del venteo, se observó que el salto hidráulico demandó un mayor flujo de aire (Q_{aire}), al reducirse la presión debido al aumento del gasto de agua y al reducirse la apertura de la compuerta. El aire que se incorporó al flujo desde el venteo provocó que el salto se recorriera hacia aguas abajo, además cuando el salto expulsó aire hacia el extremo final de la tubería, éste se movía hacia aguas arriba. Es importante mencionar que los corrimientos que experimentó el salto son de pocos centímetros. Por otra parte, se puede decir que cuando el tubo opera con flujo a superficie libre sin salto, el aire que entra por el venteo y el que sale por el extremo aguas abajo del conducto es el mismo, debido a que las oscilaciones en el valor del gasto de aire es mínimo.

Por los resultados obtenidos se puede comentar que los desplazamientos que se presentan por la vibración en un desfogue de fondo dependen del gasto de agua, del tamaño del venteo, del

tipo de flujo aguas abajo de la compuerta y del porcentaje de apertura de la misma. Además, del material del propio túnel y de las características del medio que lo confinan.

Anexos

Anexo A.1. Frecuencia natural de la tubería de estudio

En las figuras A.1 a A.5 se muestran las gráficas de densidad espectral de potencia, obtenidas de la prueba de impacto o vibración libre, y procesadas en el programa MATLAB para conocer la frecuencia de vibración máxima de la tubería experimental.

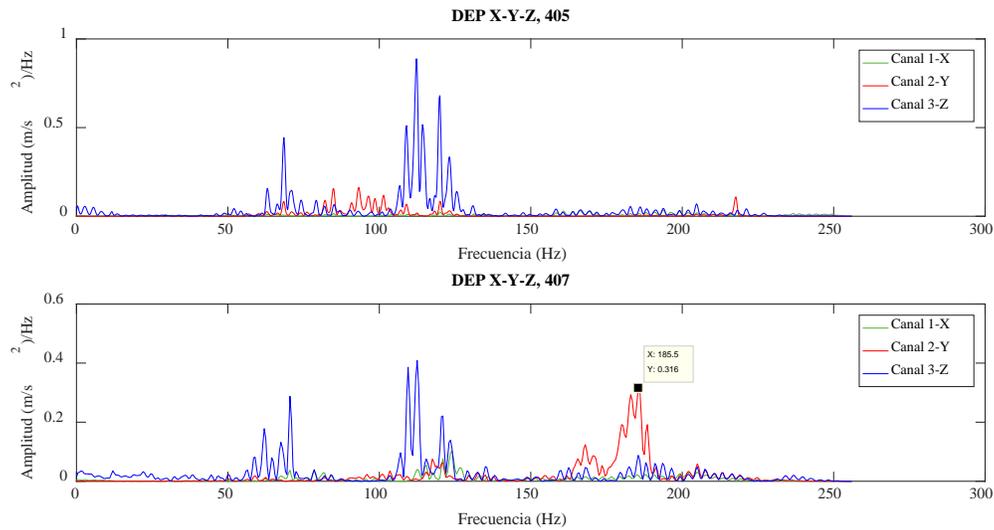


Figura A.1. Densidad espectral de potencia, golpe 2

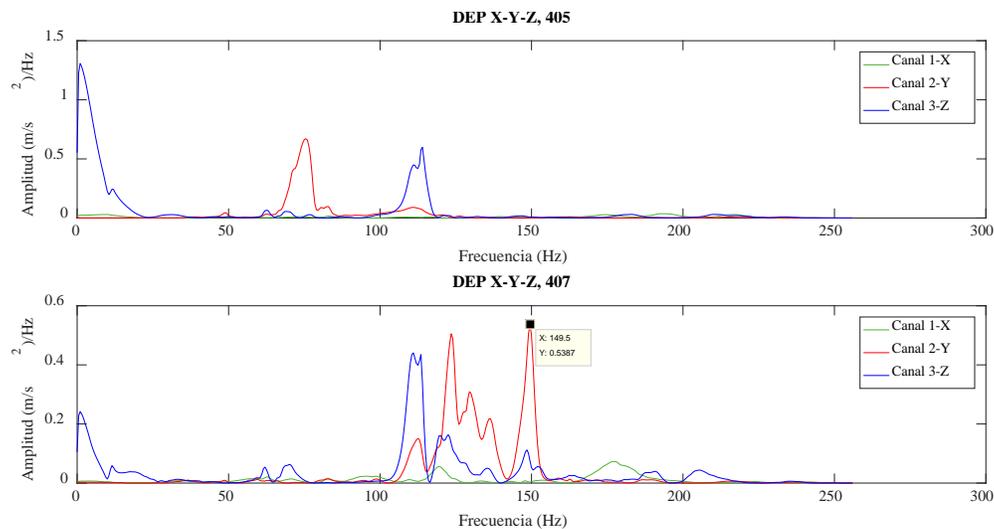


Figura A.2. Densidad espectral de potencia, golpe 3

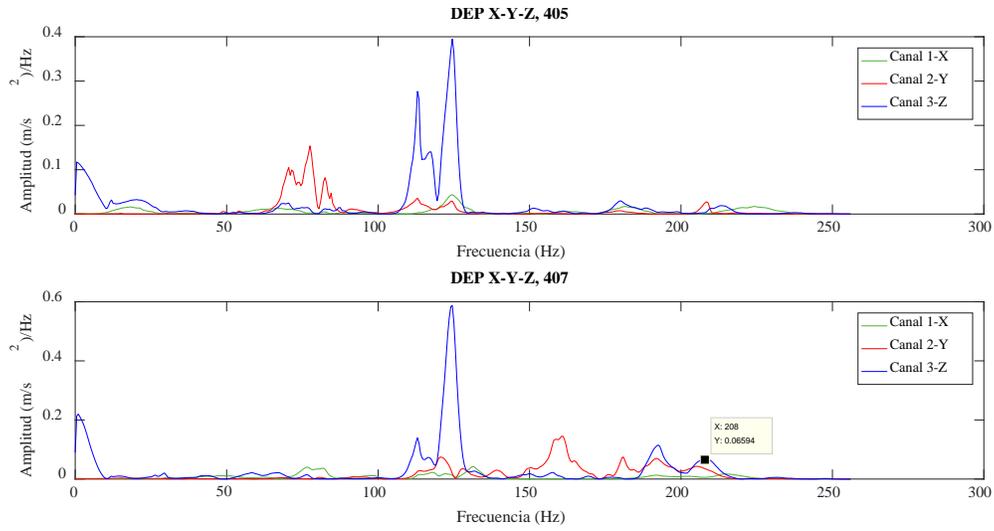


Figura A.3. Densidad espectral de potencia, golpe 4

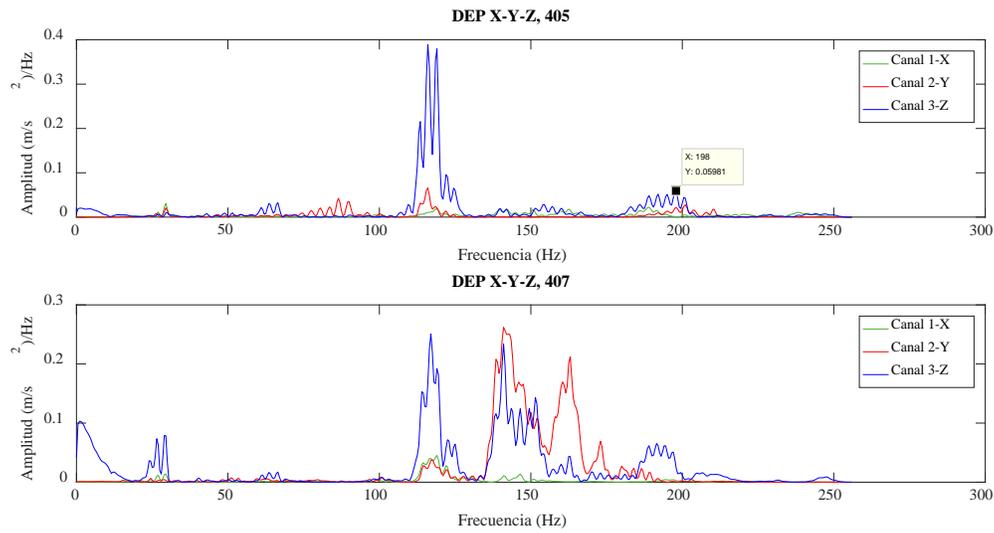


Figura A.4. Densidad espectral de potencia, golpe 5

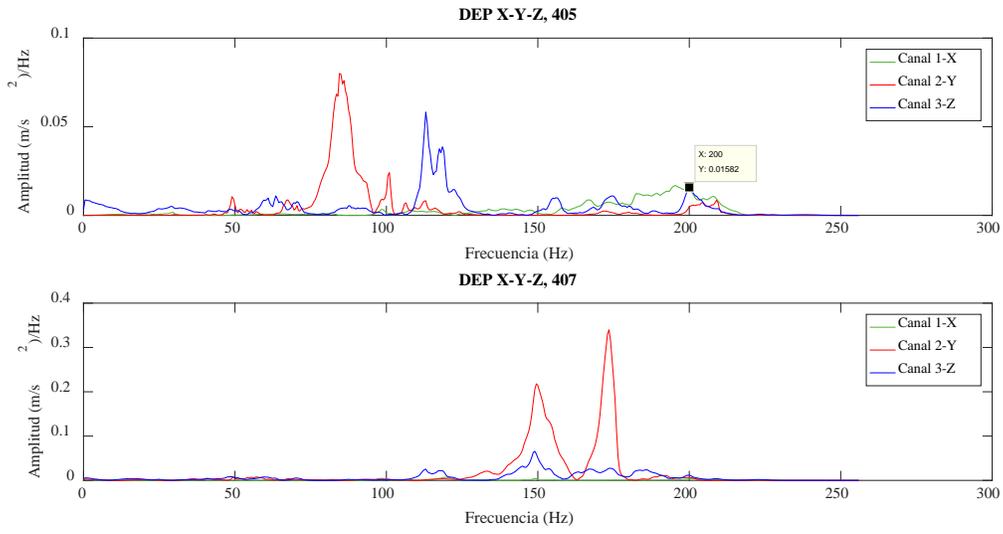


Figura A.5. Densidad espectral de potencia, golpe 6

Anexo A.2. Período de vibración y fracción de amortiguamiento

En las tablas A.1 a A.6 se muestra el resultado del periodo de vibración (T_n) y fracción de amortiguamiento (ζ) de la tubería para cada golpe tras realizar la prueba de impacto o vibración libre.

Golpe	Sensor	Canal	Pico No.	X	Ti (s)	Pico, $\ddot{U}_i(m/s^2)$	T_n	ζ	$\zeta \%$
1	405	C1 (X)	1	848	1.374	22.28	0.0075	0.0177	1.7683
			31	987	1.600	0.7949			
		C2 (Y)	1	848	1.374	15.55	0.0075	0.0262	2.6221
			37	1015	1.645	0.0413			
		C3 (Z)	1	972	1.575	40.5	0.0079	0.0178	1.7840
			35	1137	1.843	0.896			
	407	C1 (X)	1	1151	1.865	15.58	0.0080	0.0180	1.7962
			36	1323	2.144	0.3			
		C2 (Y)	1	1162	1.883	31.69	0.0075	0.0124	1.2356
			44	1361	2.206	1.125			
		C3 (Z)	1	1166	1.890	41.88	0.0076	0.0149	1.4935
			40	1349	2.186	1.078			

Tabla A.1. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 1

Golpe	Sensor	Canal	Pico No.	X	Ti (s)	Pico, $\ddot{U}_i(m/s^2)$	T_n	ζ	$\zeta \%$
2	405	C1 (X)	1	833	1.350	34.24	0.0076	0.0162	1.6205
			43	1029	1.668	0.4757			
		C2 (Y)	1	843	1.366	23.34	0.0080	0.0139	1.3904
			42	1046	1.695	0.6494			
		C3 (Z)	1	860	1.394	40.28	0.0077	0.0209	2.0870
			34	1017	1.648	0.5318			
	407	C1 (X)	1	898	1.455	29.34	0.0079	0.0181	1.8056
			37	1073	1.739	0.494			
		C2 (Y)	1	905	1.467	32.35	0.0074	0.0174	1.7372
			43	1096	1.776	0.3303			
		C3 (Z)	1	900	1.459	41.91	0.0076	0.0145	1.4470
			42	1091	1.768	1.008			

Tabla A.2. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 2

Golpe	Sensor	Canal	Pico No.	X	Ti (s)	Pico, $\ddot{U}_i(m/s^2)$	T_n	ζ	$\zeta \%$
3	405	C1 (X)	1	1018	1.650	21.81	0.0065	0.0144	1.4441
			44	1191	1.930	0.4408			
		C2 (Y)	1	1047	1.697	27.79	0.0082	0.0156	1.5554
			35	1220	1.977	1.002			
		C3 (Z)	1	1031	1.671	40.3	0.0079	0.0172	1.7217
			43	1236	2.003	0.4286			
	407	C1 (X)	1	1000	1.621	23.63	0.0073	0.0143	1.4310
			44	1194	1.935	0.4948			
		C2 (Y)	1	998	1.618	32.28	0.0082	0.0111	1.1089
			49	1241	2.011	1.139			
		C3 (Z)	1	1007	1.632	41.43	0.0075	0.0159	1.5918
			41	1193	1.934	0.7583			

Tabla A.3. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 3

Golpe	Sensor	Canal	Pico No.	X	Ti (s)	Pico, $\ddot{U}_i(m/s^2)$	T_n	ζ	$\zeta \%$
5	405	C1 (X)	1	848	1.374	22.28	0.0082	0.0164	1.6401
			36	1024	1.660	0.6047			
		C2 (Y)	1	848	1.374	15.55	0.0083	0.0132	1.3246
			40	1047	1.697	0.6054			
		C3 (Z)	1	873	1.415	32.75	0.0075	0.0191	1.9143
			36	1034	1.676	0.4863			
	407	C1 (X)	1	1317	2.135	13.9	0.0080	0.0112	1.1213
			48	1548	2.509	0.5069			
		C2 (Y)	1	1335	2.164	32.29	0.0066	0.0174	1.7366
			41	1498	2.428	0.4107			
		C3 (Z)	1	1339	2.170	41.86	0.0068	0.0195	1.9480
			38	1494	2.421	0.4519			

Tabla A.4. Período de vibración y fracción de amortiguamiento, golpe 5

Golpe	Sensor	Canal	Pico No.	X	Ti (s)	Pico, $\ddot{U}_i(m/s^2)$	T_n	ζ	$\zeta \%$
6	405	C1 (X)	1	2136	3.462	30.64	0.0079	0.0193	1.9282
			34	2297	3.723	0.5623			
		C2 (Y)	1	2163	3.506	19.59	0.0083	0.0138	1.3792
			43	2379	3.856	0.5145			
		C3 (Z)	1	2134	3.459	33.17	0.0081	0.0190	1.8962
			38	2320	3.760	0.4039			
	407	C1 (X)	1	1090	1.767	8.479	0.0073	0.0113	1.1322
			46	1293	2.096	0.3452			
		C2 (Y)	1	1121	1.817	32.25	0.0068	0.0105	1.0545
			62	1376	2.230	0.5667			
		C3 (Z)	1	1093	1.771	31.03	0.0068	0.0138	1.3776
			48	1290	2.091	0.5309			

Tabla A.5. Período de vibración y fracción de amortiguamiento o, golpe 6

Anexo A.3. Código de MATLAB

Para realizar el proceso de ajuste, filtrado y análisis espectral de potencia de cada señal es necesario precisar el siguiente punto:

Las señales “x”, “y” y “z” se analizan de forma independiente. Para el proceso de las señales de vibración en la parte superior e inferior de la tubería los datos “crudos” registrados por los sensores son importados al programa MATLAB sin ningún cambio, esto no sucede con las vibraciones obtenidas en la parte media, ya que al girar el sensor alrededor de la tubería, la orientación de sus ejes cambia, por lo que al importar estos datos es necesario intercambiar las variables “y-z” a “z-y” para que al momento de calcular los desplazamientos, éstos puedan ser comparables entre sí. En la figura A.6 se muestra un esquema del cambio de orientación de los ejes del sensor.

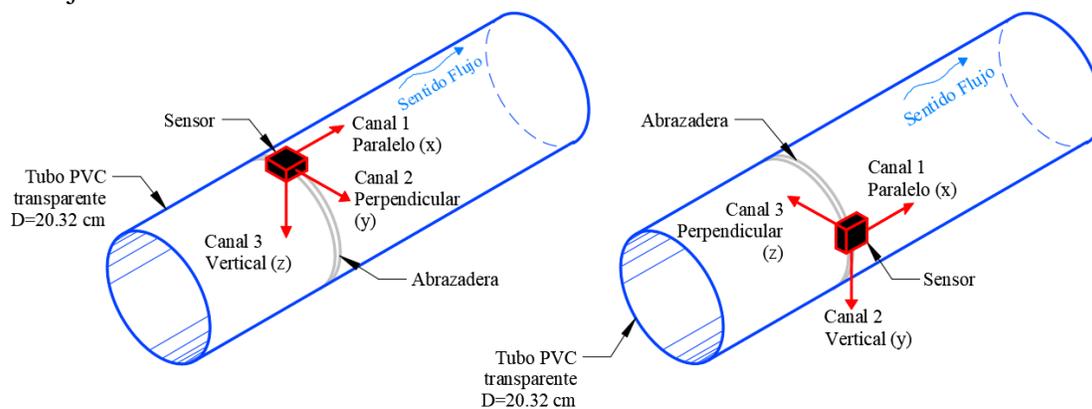


Figura A.6. Esquema de la zona de medición superior (imagen izquierda) y zona media (imagen derecha) del conducto

A continuación se presenta el código utilizado en el programa MATLAB para ajustar, filtrar y obtener la densidad espectral de potencia de la señal en dirección “x”, “y” y “z”.

% Nombre de la señal: X1

```
NPointsx1 = length(X1);           % # Puntos en la señal
fx1 = 512;                         % Frecuencia de la señal (editable)
Dtx1 = 1/fx1;                       % Intervalo de tiempo de la señal
Dtimex1 = Dtx1*NPointsx1;          % Duración de la señal
```

% Preparación de los datos a filtrar

```
gm_data1x1 = X1;
n_fcx1 = 4;                         % Orden del filtro
fc_lowcutx1 = 200;                  % Frecuencia de corte: a partir de la cual se quita energía (editable)
fsx1 = 1/Dtx1;                      % Frecuencia de muestreo
```

% Corrección de la línea base

```
gm_data1x1 = gm_data1x1 - mean(gm_data1x1);
time_padx1 = 1.5*n_fcx1/fc_lowcutx1(1);
```

```
gm_data1x1 = [zeros(round(time_padx1*fsx1/2),1); gm_data1x1;  
zeros(round(time_padx1*fsx1/2),1)];
```

```
% Filtro Pasa Altas (por abajo de la frecuencia de corte quita energía)  
[b_filterx1,a_filterx1] = butter(n_fcx1/2,fc_lowcutx1/(fsx1/2),'low'); % Filtro (Butterworth)  
de paso alto
```

```
% Diseño de filtro (Butterworth IIR) utilizando objeto de especificación  
gm_data1x1 = filtfilt(b_filterx1,a_filterx1,gm_data1x1); % Filtrado digital de fase cero
```

```
% Reajuste del número total de puntos del registro filtrado  
NRecordx1 = gm_data1x1;  
NRecordx1(1:round(time_padx1*fsx1/2)) = [];  
NRecordx1(NPointsx1+1:length(NRecordx1)) = [];
```

```
% Grafica el espectro y la frecuencia del registro filtrado  
[x1Pxx,wx1] = pwelch(NRecordx1,[],[],[],fsx1,'onesided'); %  
pwelch(F,[],[],[],Fs,'onesided');
```

% Nombre de la señal es Y1

```
NPointsy1 = length(Y1); % # Puntos en la señal  
fy1 = 512; % Frecuencia de la señal (editable)  
Dty1 = 1/fy1; % Intervalo de tiempo de la señal  
Dtimey1 = Dty1*NPointsy1; % Duración de la señal
```

% Preparación de los datos a filtrar

```
gm_data1y1 = Y1;  
n_fcy1 = 4; % Orden del filtro  
fc_lowcuty1 = 200; % Frecuencia de corte: a partir de la cual se quita energía  
(editable)  
fsy1 = 1/Dty1; % Frecuencia de muestreo
```

% Corrección de la línea base

```
gm_data1y1 = gm_data1y1 - mean(gm_data1y1);  
time_pady1 = 1.5*n_fcy1/fc_lowcuty1(1);  
gm_data1y1 = [zeros(round(time_pady1*fsy1/2),1); gm_data1y1;  
zeros(round(time_pady1*fsy1/2),1)];
```

```
% Filtro Pasa Altas (por abajo de la frecuencia de corte quita energía)  
[b_filtery1,a_filtery1] = butter(n_fcy1/2,fc_lowcuty1/(fsy1/2),'low'); % Filtro (Butterworth)  
de paso alto
```

```
% Diseño de filtro (Butterworth IIR) utilizando objeto de especificación  
gm_data1y1 = filtfilt(b_filtery1,a_filtery1,gm_data1y1); % Filtrado digital de fase cero
```

```
% Reajuste del número total de puntos del registro filtrado
NRecordy1 = gm_data1y1;
NRecordy1(1:round(time_pady1*fsy1/2)) = [];
NRecordy1(NPointsy1+1:length(NRecordy1)) = [];

% Grafica el espectro y la frecuencia del registro filtrado
[y1Pxx,wy1] = pwelch(NRecordy1,[],[],[],fsy1,'onesided'); %
pwelch(F,[],[],[],Fs,'onesided');

%Nombre de la señal es Z1
NPointsz1= length(Z1);           % # Puntos en la señal
fz1 = 512;                       % Frecuencia de la señal (editable)
Dtz1 = 1/fz1;                    % Intervalo de tiempo de la señal
Dtimez1 = Dtz1*NPointsz1;       % Duración de la señal

% Preparación de los datos a filtrar
gm_data1z1 = Z1;
n_fc1 = 4;                       % Orden del filtro
fc_lowcutz1 = 200;               % Frecuencia de corte: a partir de la cual se quita energía (editable)
fsz1 = 1/Dtz1;                  % Frecuencia de muestreo

% Corrección de la línea base
gm_data1z1 = gm_data1z1 - mean(gm_data1z1);
time_padz1 = 1.5*n_fc1/fc_lowcutz1(1);
gm_data1z1 = [zeros(round(time_padz1*fsz1/2),1); gm_data1z1;
zeros(round(time_padz1*fsz1/2),1)];

% Filtro Pasa Altas (por abajo de la frecuencia de corte quita energía)
[b_filterz1,a_filterz1] = butter(n_fc1/2,fc_lowcutz1/(fsz1/2),'low'); % Filtro (Butterworth)
de paso alto

% Diseño de filtro (Butterworth IIR) utilizando objeto de especificación
gm_data1z1 = filtfilt(b_filterz1,a_filterz1,gm_data1z1); % Filtrado digital de fase cero

% Reajuste del número total de puntos del registro filtrado
NRecordz1 = gm_data1z1;
NRecordz1(1:round(time_padz1*fsz1/2)) = [];
NRecordz1(NPointsz1+1:length(NRecordz1)) = [];

% Grafica el espectro y la frecuencia del registro filtrado
[z1Pxx,wz1] = pwelch(NRecordz1,[],[],[],fsz1,'onesided'); pwelch(F,[],[],[],Fs,'onesided');

% Matriz ordenada para procesamiento de diferencia central
a_aLec_1=[NRecordx1,NRecordy1,NRecordz1]; %el proceso de diferencia central requiere
la señal ajustada y filtrada.
```

Anexo A.4. Densidad espectral de potencia DEP

A continuación se muestran las gráficas de densidad espectral de potencia correspondientes a los desplazamientos mostrados en el capítulo 6.

Flujo a superficie libre (SSH)

Compuerta del 10% de apertura

La figura A.7 muestra la densidad espectral de potencia de la compuerta del 10% de apertura, utilizando el gasto máximo de 35 l/s en la parte superior. La gráfica está dividida en 2 columnas: aguas arriba y aguas abajo. Las 4 filas corresponden a las mediciones con respecto a la distancia de la compuerta, siendo las primeras las más cercanas a dicha compuerta.

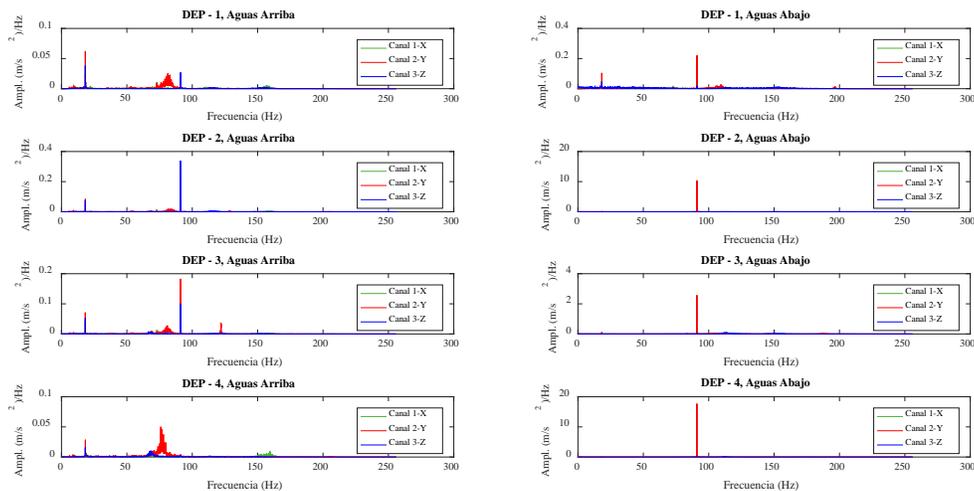


Figura A.7. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, $Q = 35.04$ l/s, SSH, parte superior

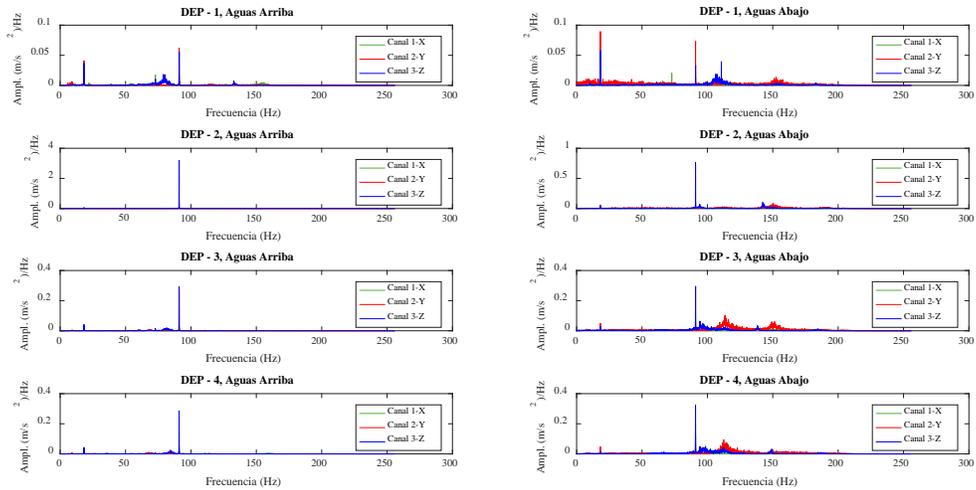


Figura A.8. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, $Q = 35.04$ l/s, SSH, parte media

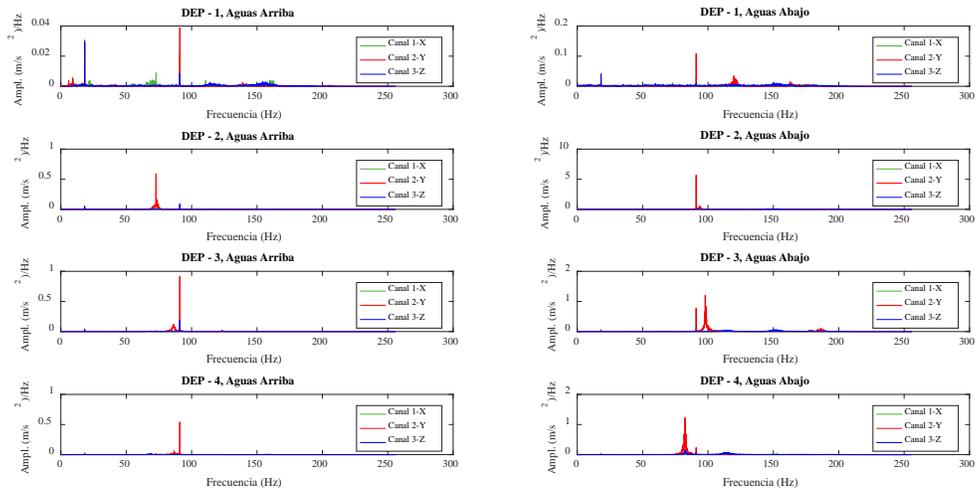


Figura A.9. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, $Q = 35.04$ l/s, SSH, parte inferior

Compuerta del 20% de apertura

Para las compuertas del 20% al 40% se muestra la densidad espectral de potencia utilizando el gasto máximo que fue de 40 l/s, aproximadamente.

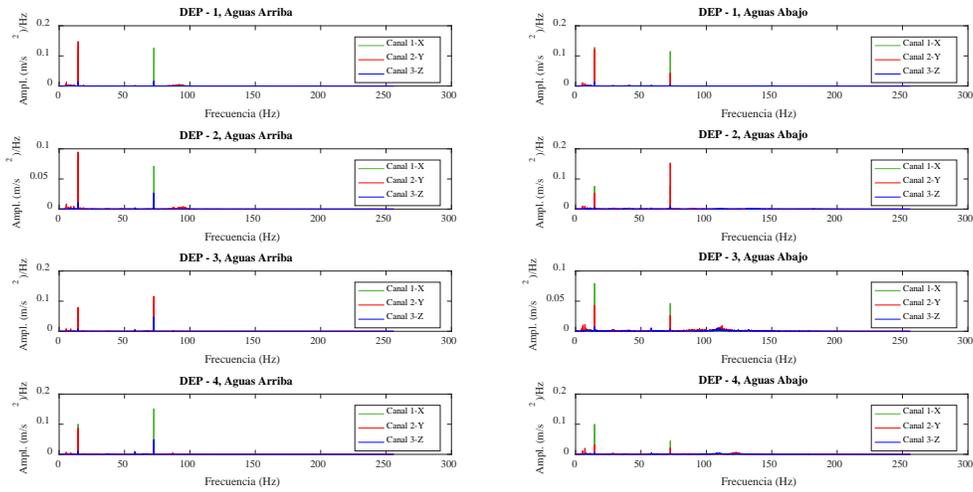


Figura A.10. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, $Q = 40.46$ l/s, SSH, parte superior

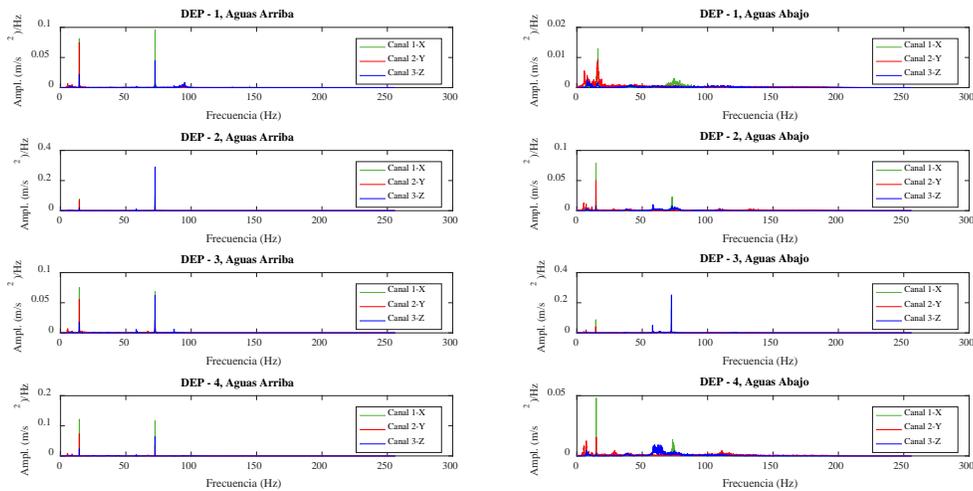


Figura A.11. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, $Q = 40.46$ l/s, SSH, parte media

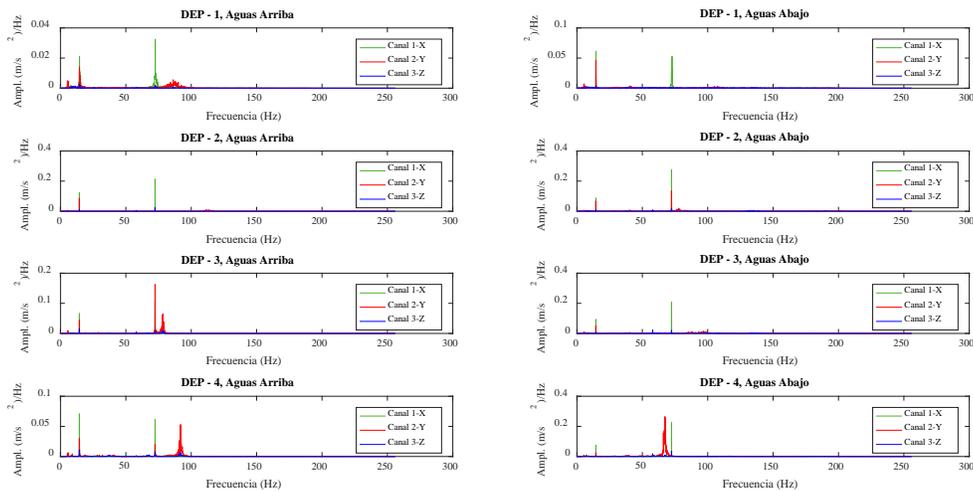


Figura A.12. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, $Q = 40.46$ l/s, SSH, parte inferior

Compuerta del 30% de apertura

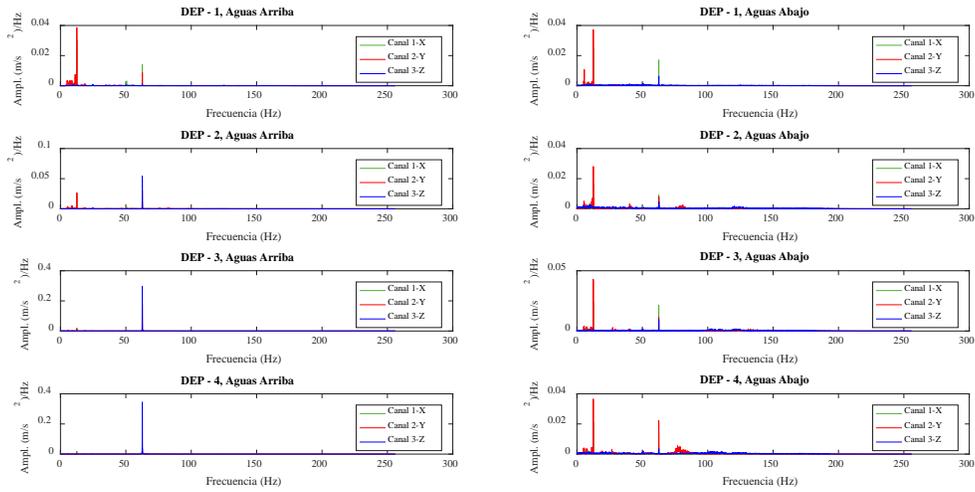


Figura A.13. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.56 l/s, SSH, parte superior

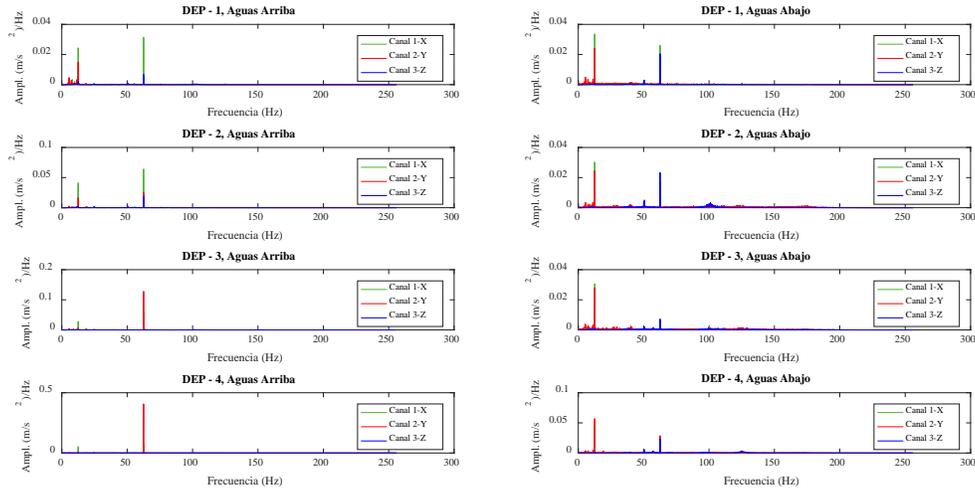


Figura A.14. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, Q = 40.56 l/s, SSH, parte media

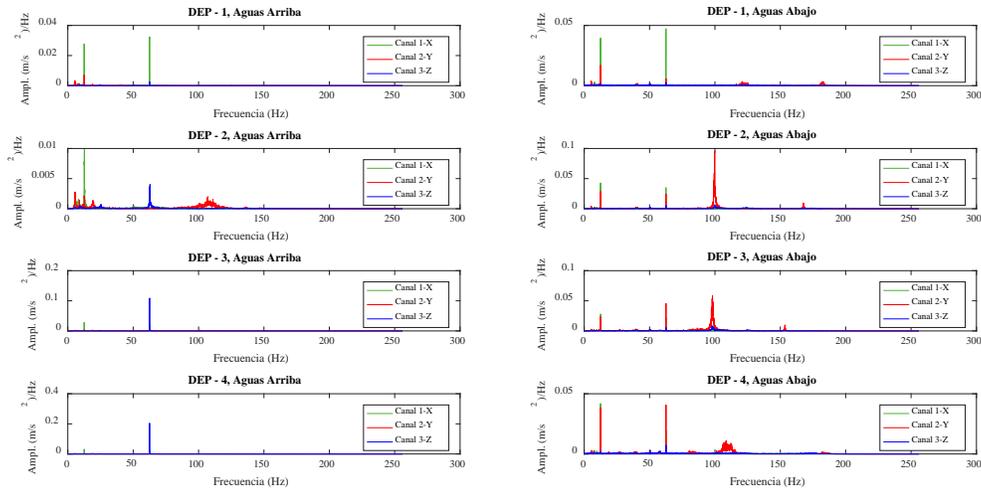


Figura A.15. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, $Q = 40.56$ l/s, SSH, parte inferior

Compuerta del 40% de apertura

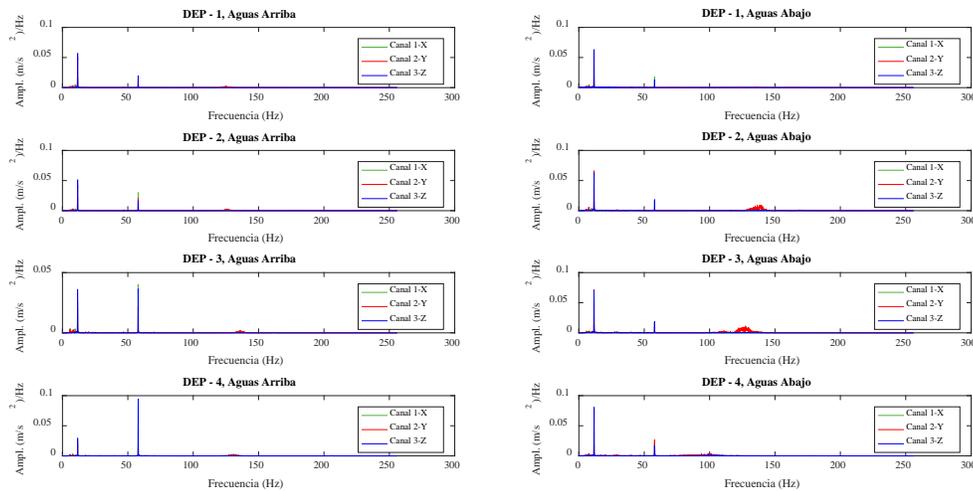


Figura A.16. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.22$ l/s, SSH, parte superior

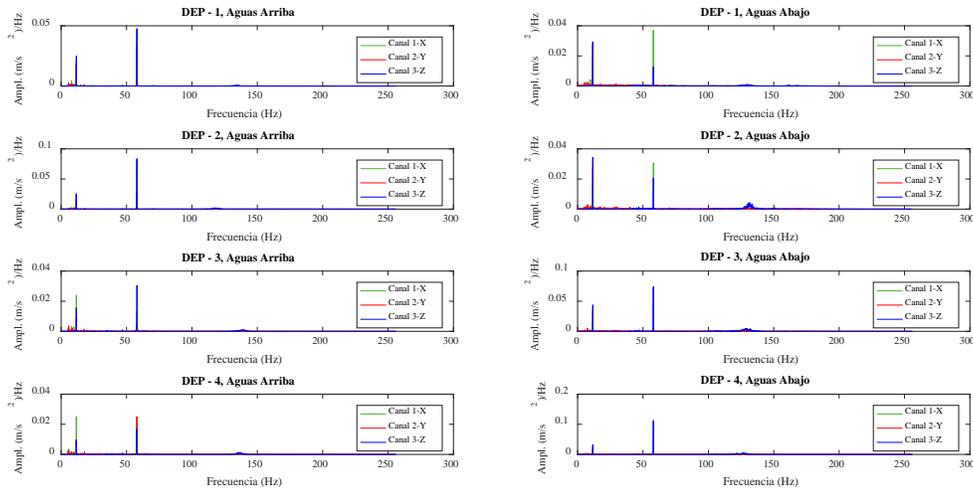


Figura A.17. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.22$ l/s, SSH, parte media

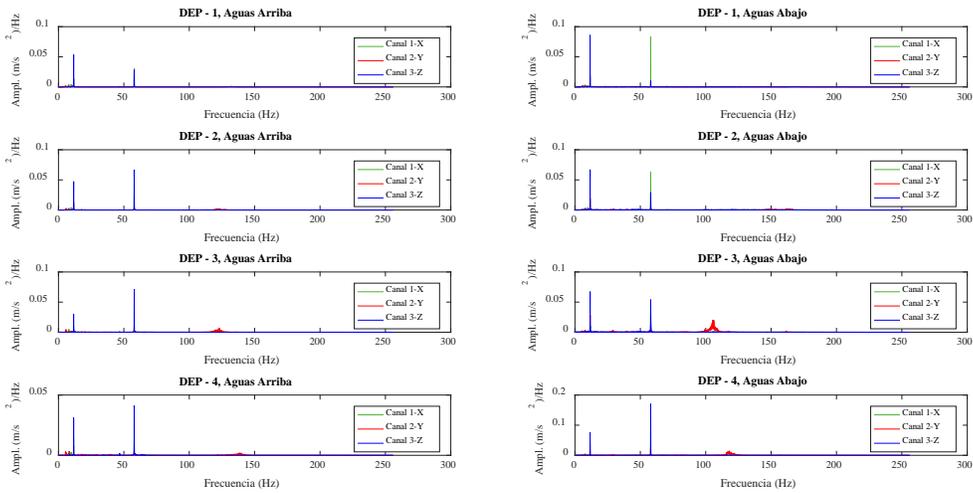


Figura A.18. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.22$ l/s, SSH, parte inferior

Flujo con salto hidráulico (CSH)

Compuerta del 10% de apertura

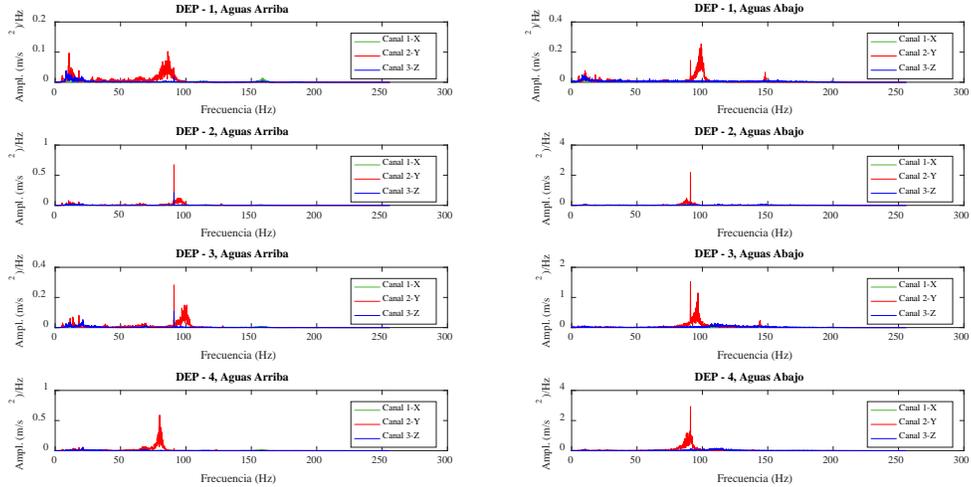


Figura A.19. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.24 l/s, CSH, parte superior

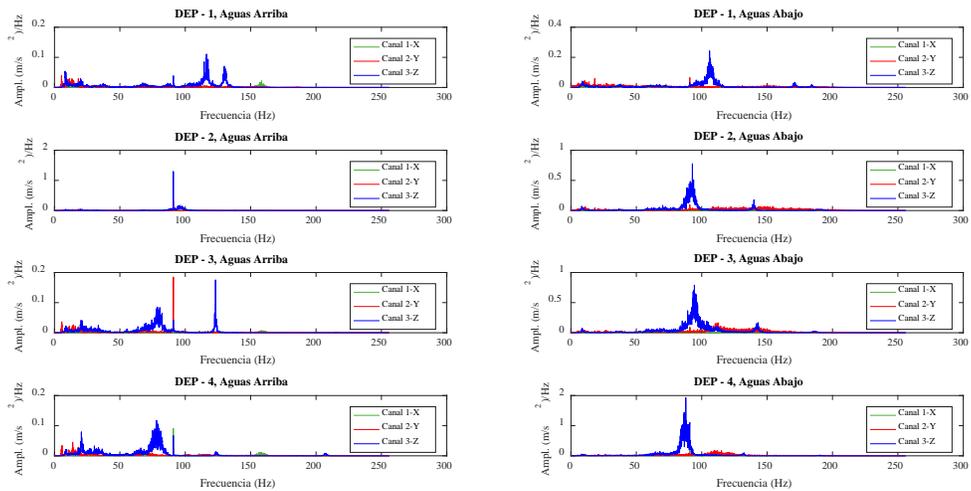


Figura A.20. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.24 l/s, CSH, parte media

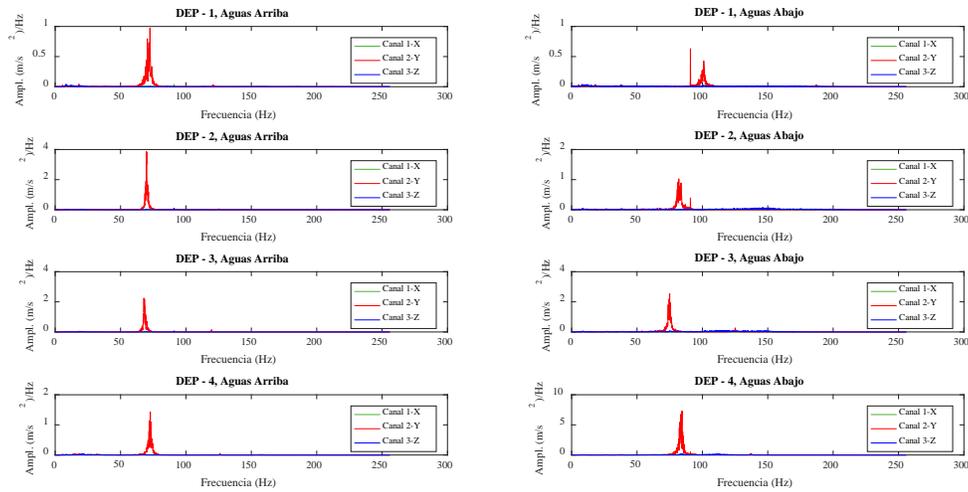


Figura A.21. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, $Q = 35.24$ l/s, CSH, parte inferior

Compuerta del 20% de apertura

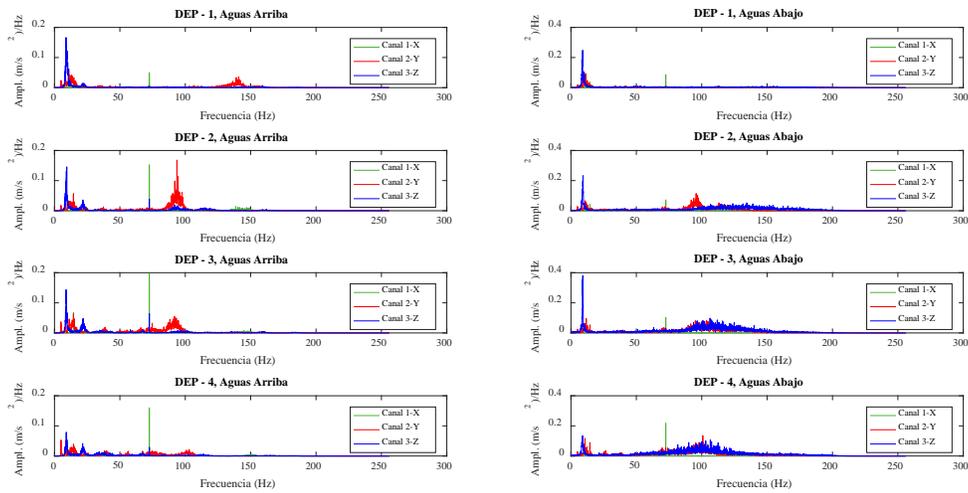


Figura A.22. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, $Q = 40.36$ l/s, CSH, parte superior

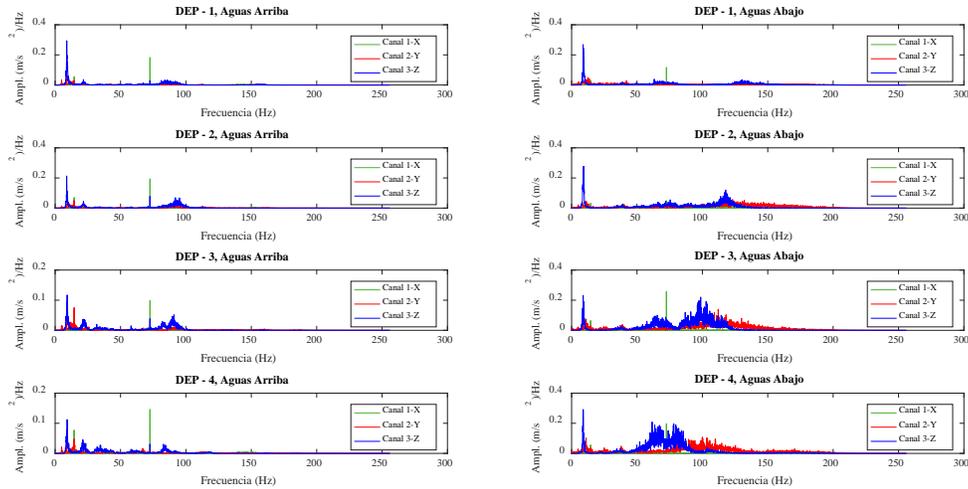


Figura A.23. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.36 l/s, CSH, parte media

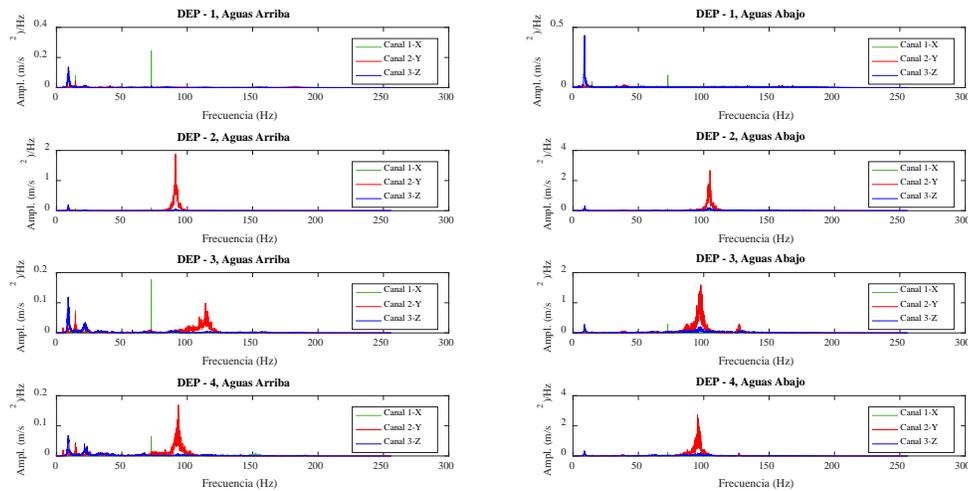


Figura A.24. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.36 l/s, CSH, parte inferior

Compuerta del 30% de apertura

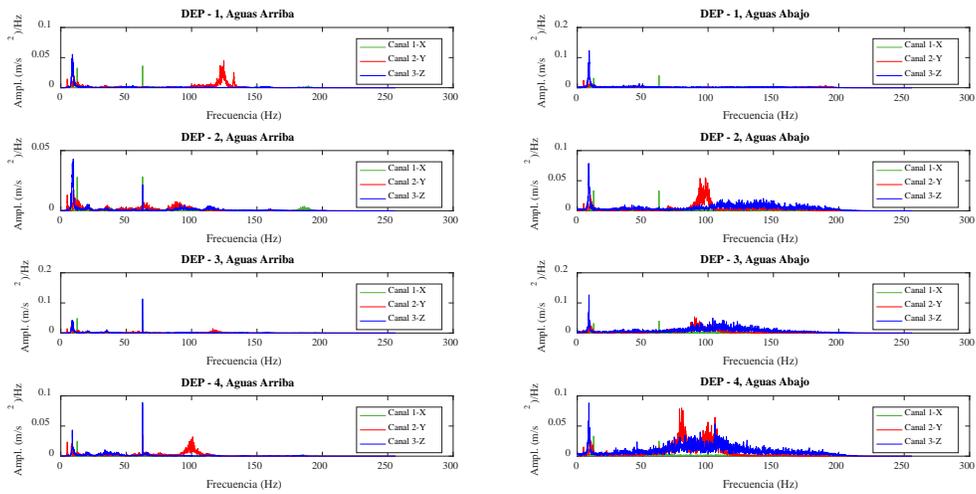


Figura A.25. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, $Q = 40.23$ l/s, CSH, parte superior

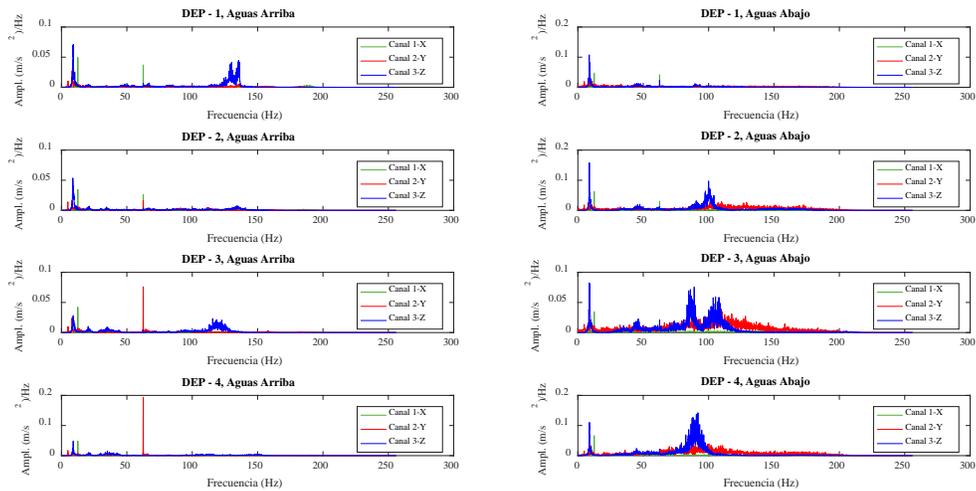


Figura A.26. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, $Q = 40.23$ l/s, CSH, parte media

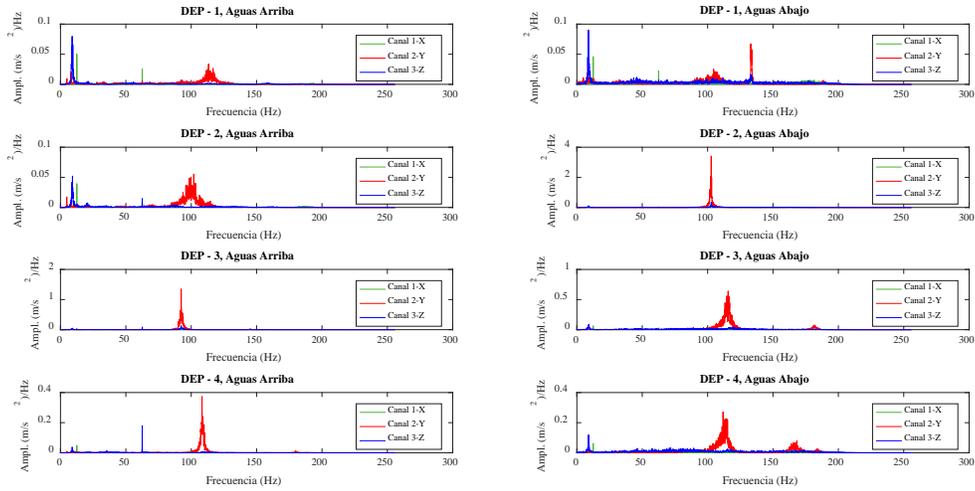


Figura A.27. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, $Q = 40.23$ l/s, CSH, parte inferior

Compuerta del 40% de apertura

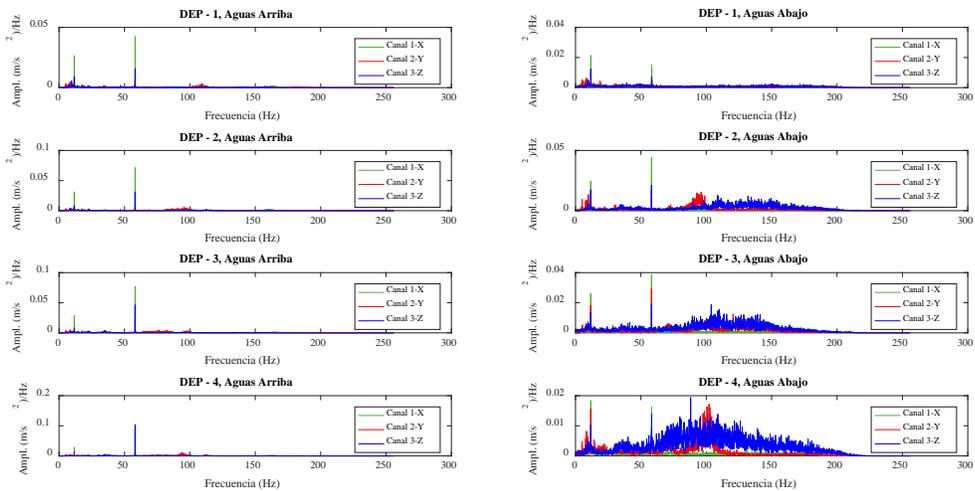


Figura A.28. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.26$ l/s, CSH, parte superior

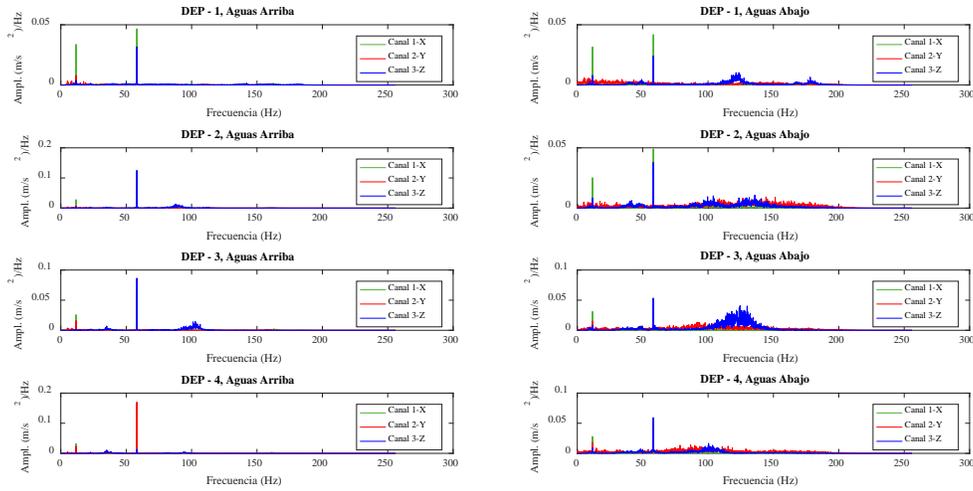


Figura A.29. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.26$ l/s, CSH, parte media

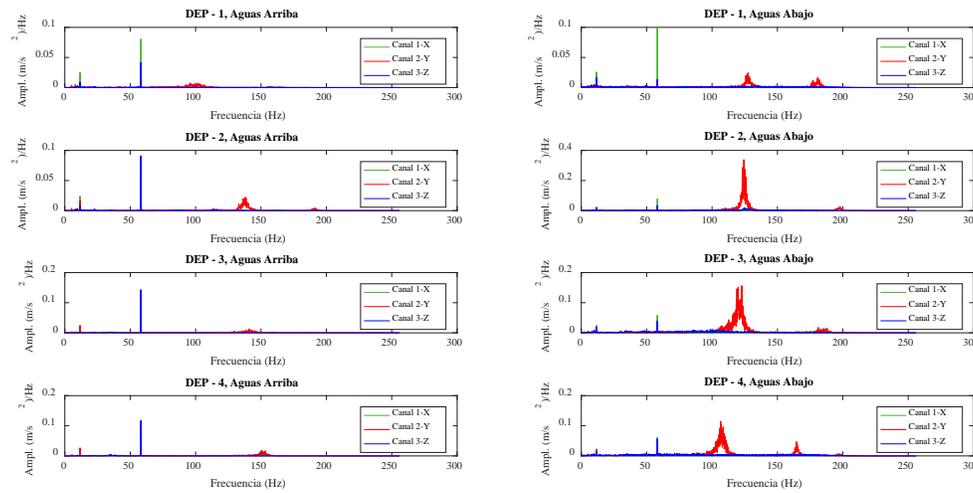


Figura A.30. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.26$ l/s, CSH, parte inferior

Compuerta del 50% de apertura

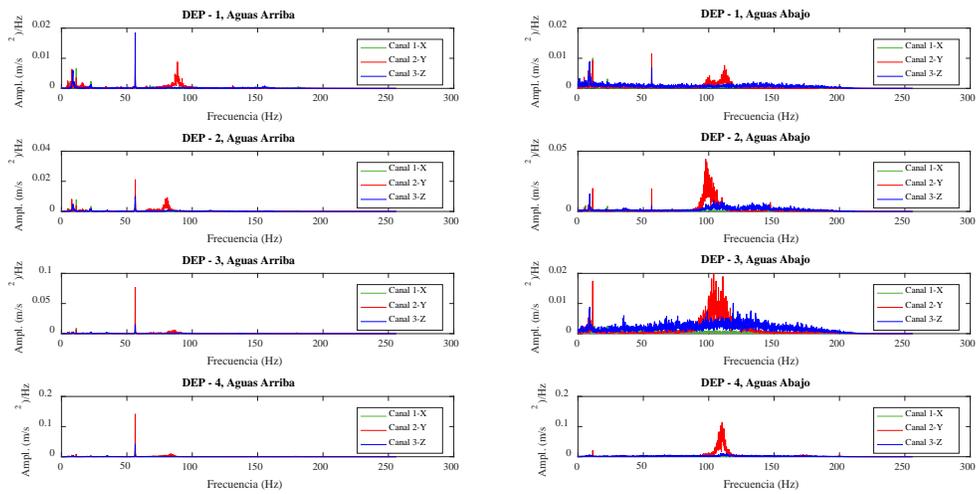


Figura A.31. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, $Q = 40.73$ l/s, CSH, parte superior

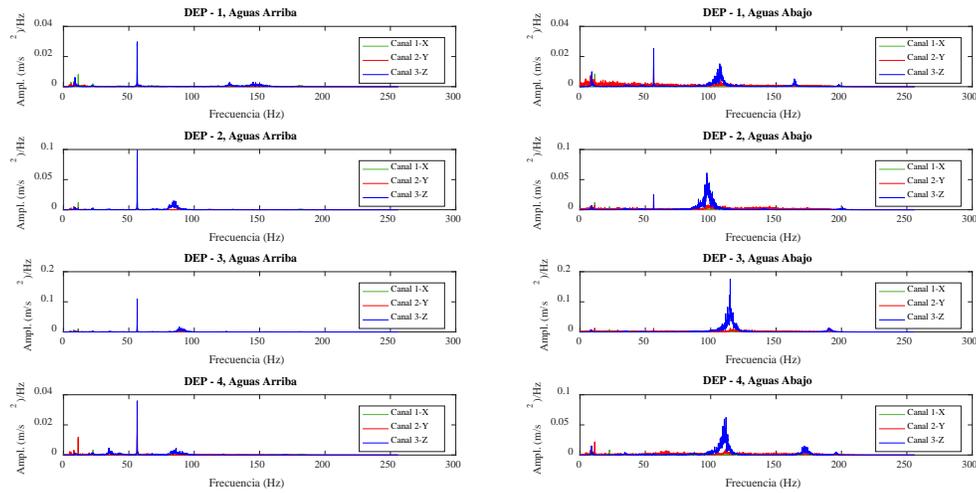


Figura A.32. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, $Q = 40.73$ l/s, CSH, parte media

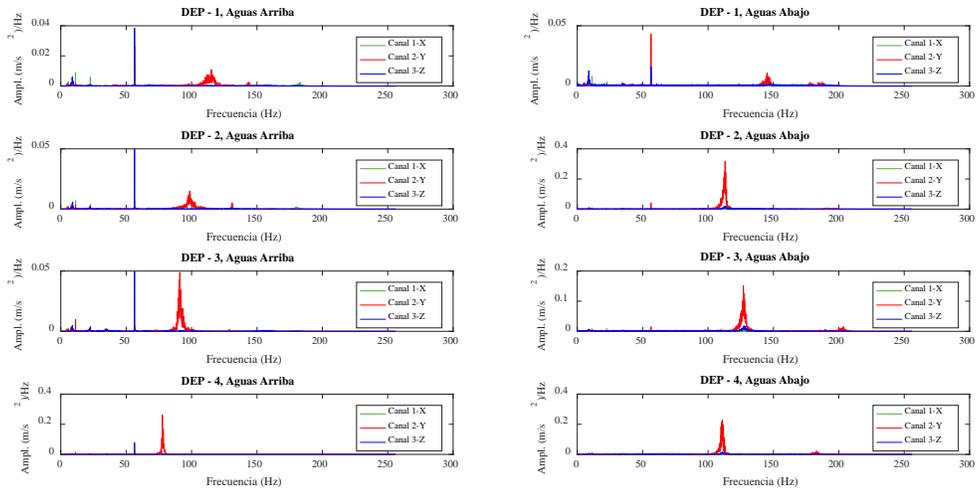


Figura A.33. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, $Q = 40.73$ l/s, CSH, parte inferior

Compuerta del 60% de apertura

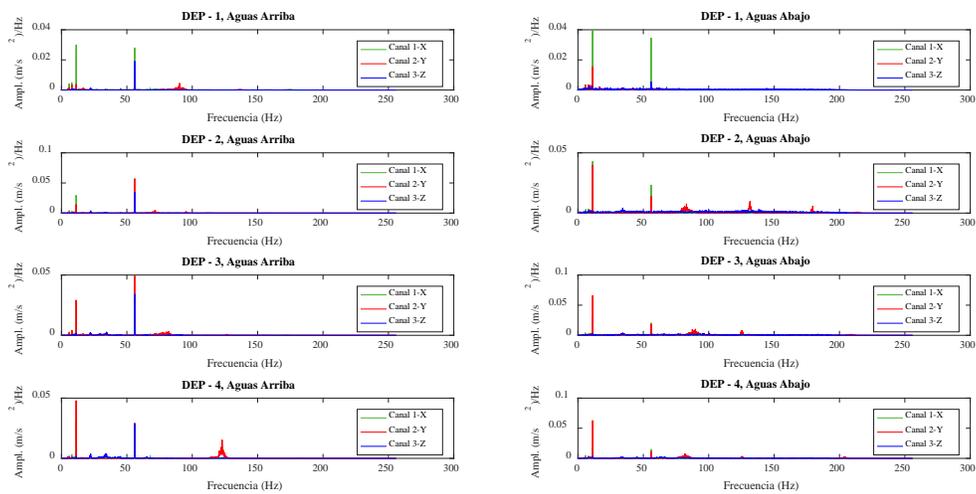


Figura A.34. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, $Q = 40.70$ l/s, CSH, parte superior

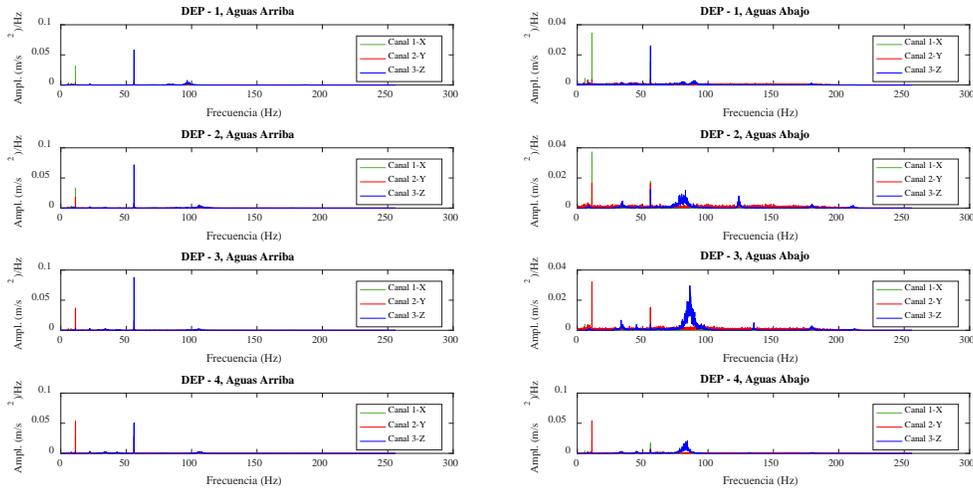


Figura A.35. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.70 l/s, CSH, parte media

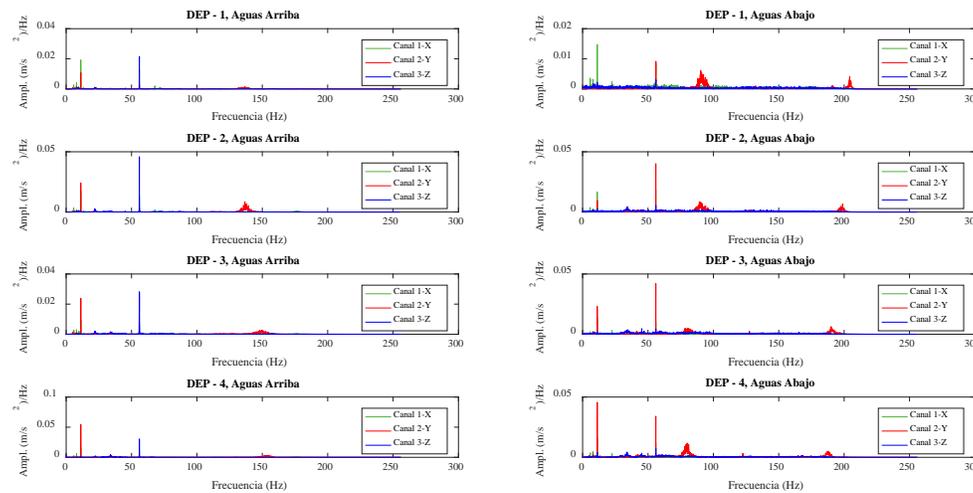


Figura A.36. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, Q = 40.70 l/s, CSH, parte inferior

Sin dispositivo aireador o venteo (SV)

Compuerta del 10% de apertura

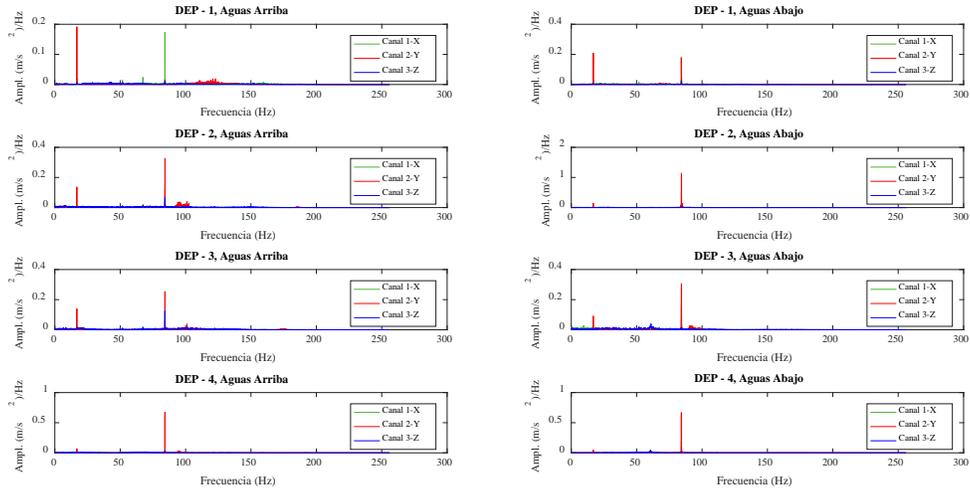


Figura A.37. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.30 l/s, SV, parte superior

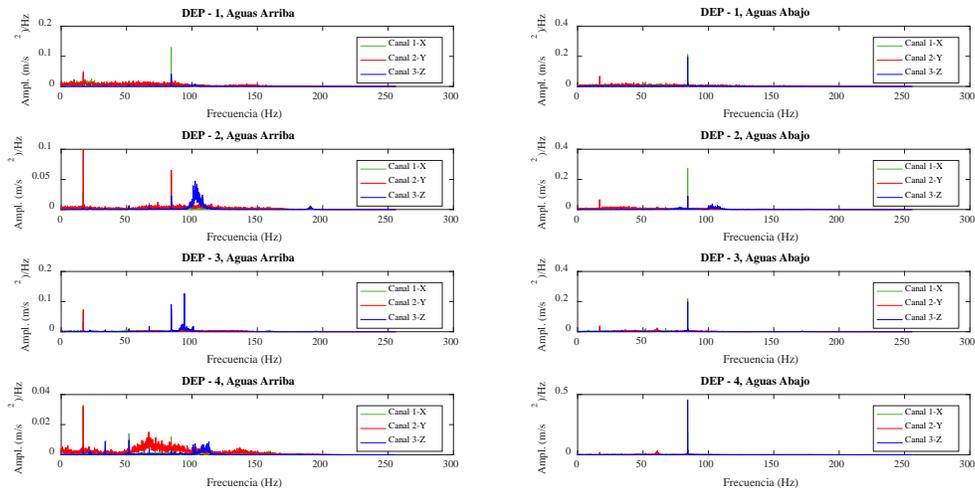


Figura A.38. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, Q = 35.30 l/s, SV, parte media

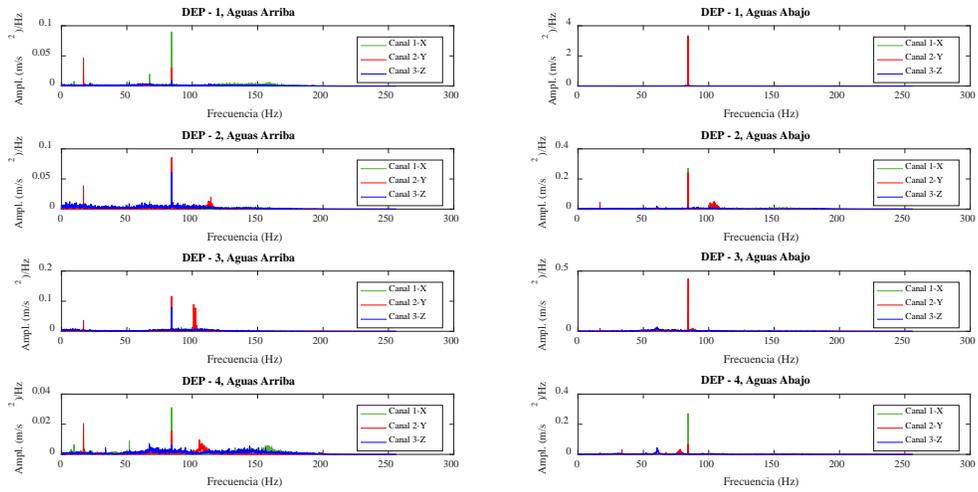


Figura A.39. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C10%, $Q = 35.30$ l/s, SV, parte inferior

Compuerta del 20% de apertura

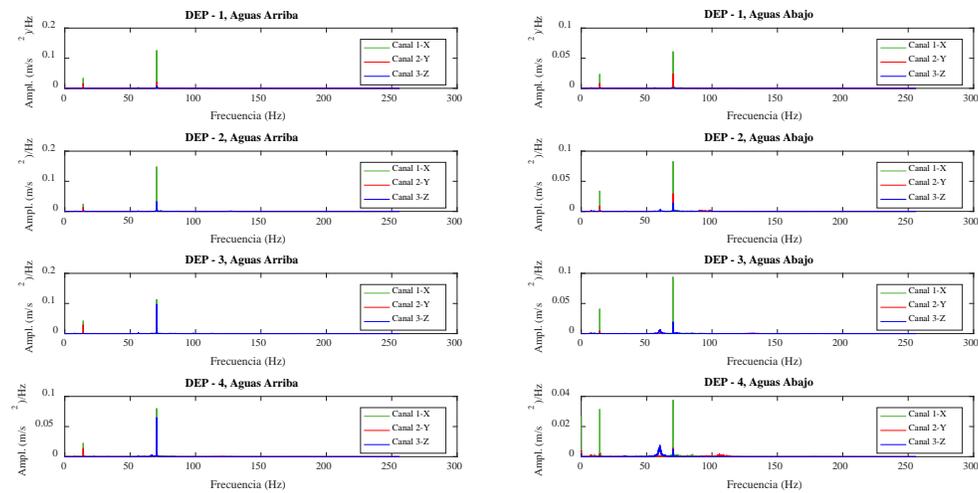


Figura A.40. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, $Q = 40.70$ l/s, SV, parte superior

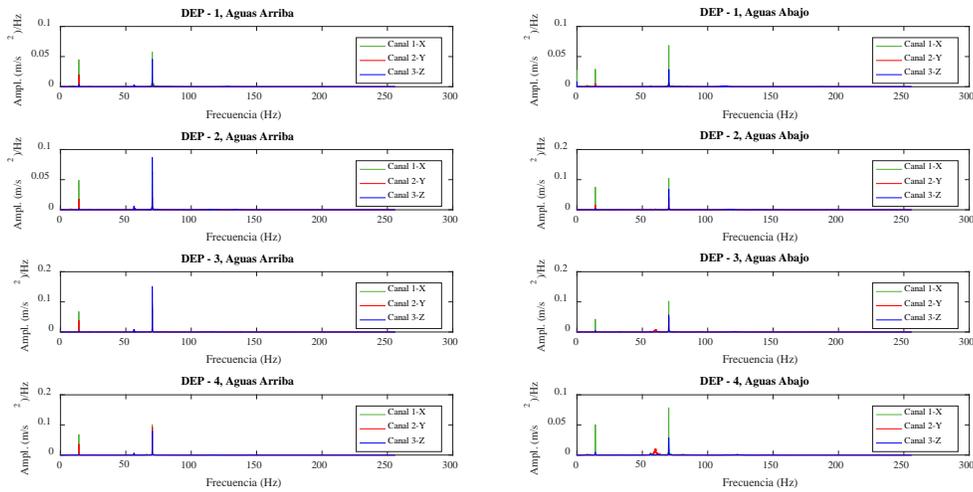


Figura A.41. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.70 l/s, SV, parte media

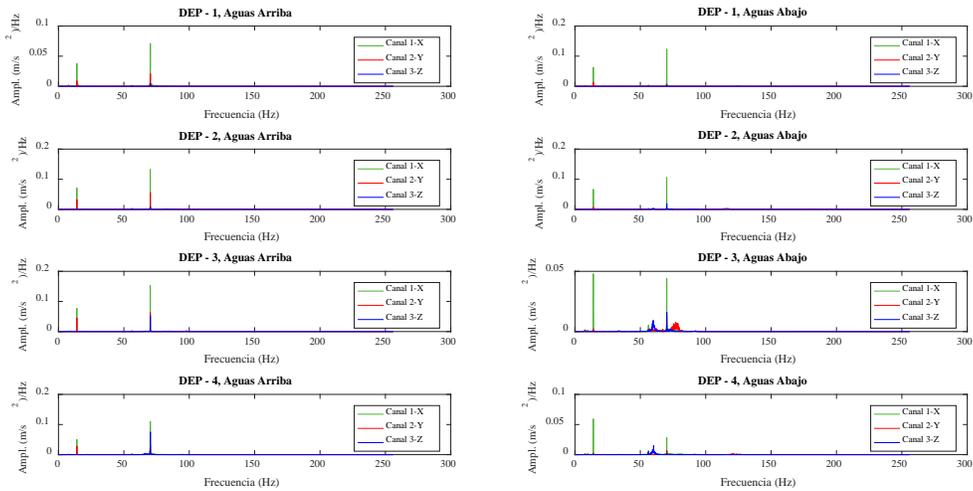


Figura A.42. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C20%, Q = 40.70 l/s, SV, parte inferior

Compuerta del 30% de apertura

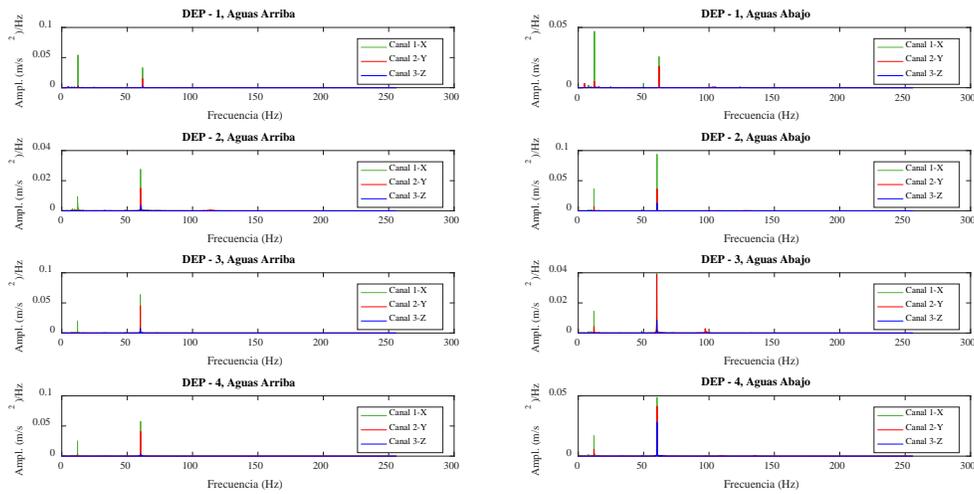


Figura A.43. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, $Q = 40.34$ l/s, SV, parte superior

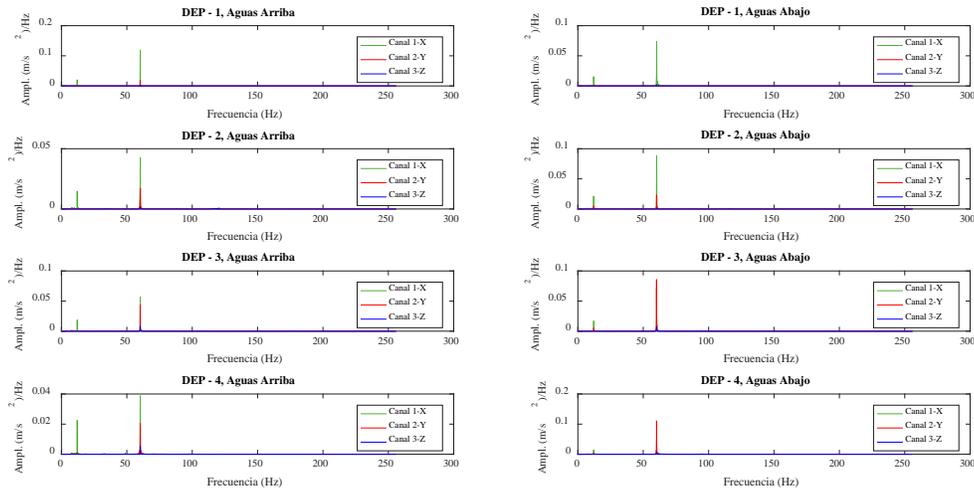


Figura A.44. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, $Q = 40.34$ l/s, SV, parte media

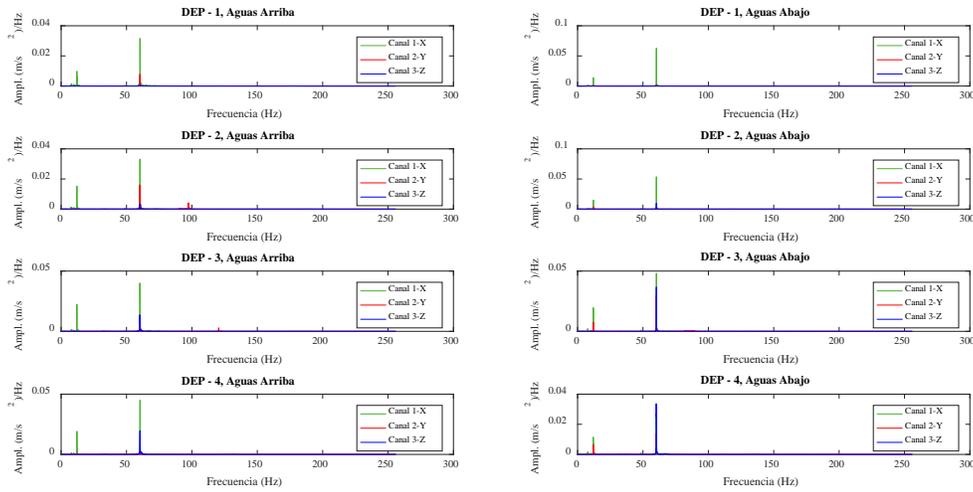


Figura A.45. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C30%, $Q = 40.34$ l/s, SV, parte inferior

Compuerta del 40% de apertura

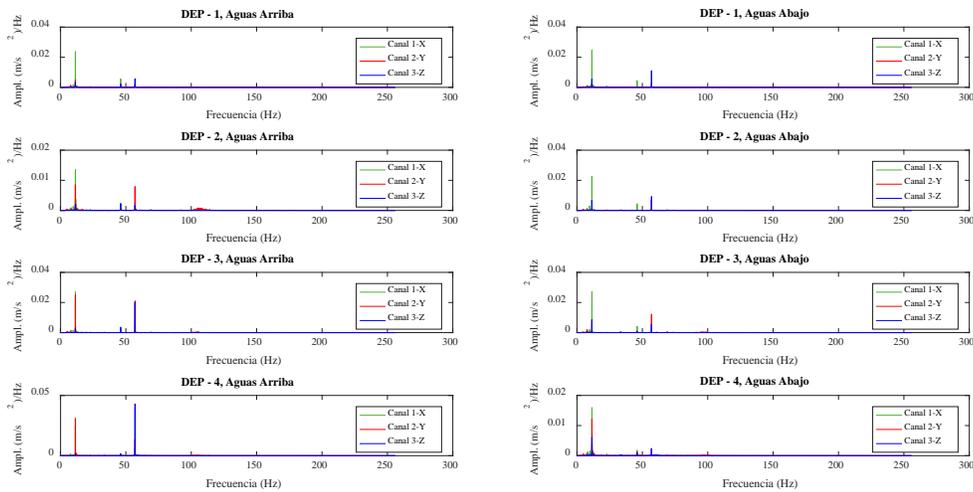


Figura A.46. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.53$ l/s, SV, parte superior

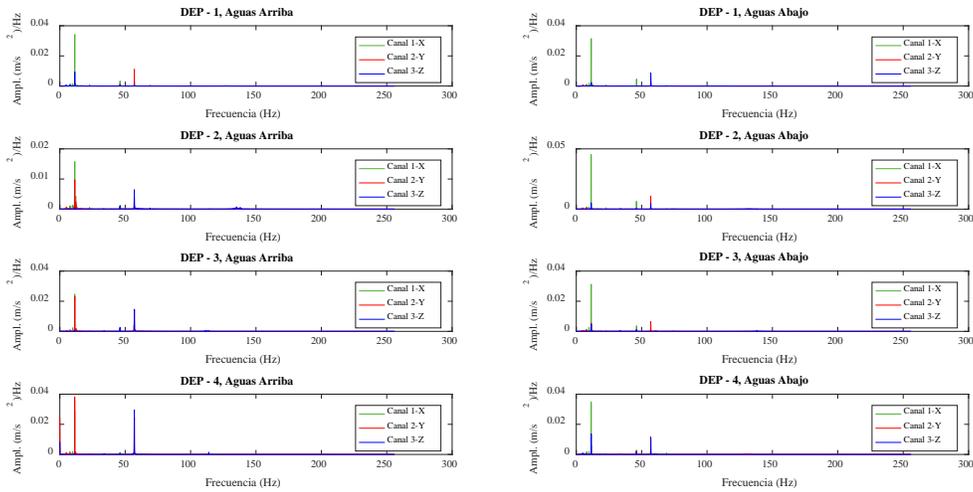


Figura A.47. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.53$ l/s, SV, parte media

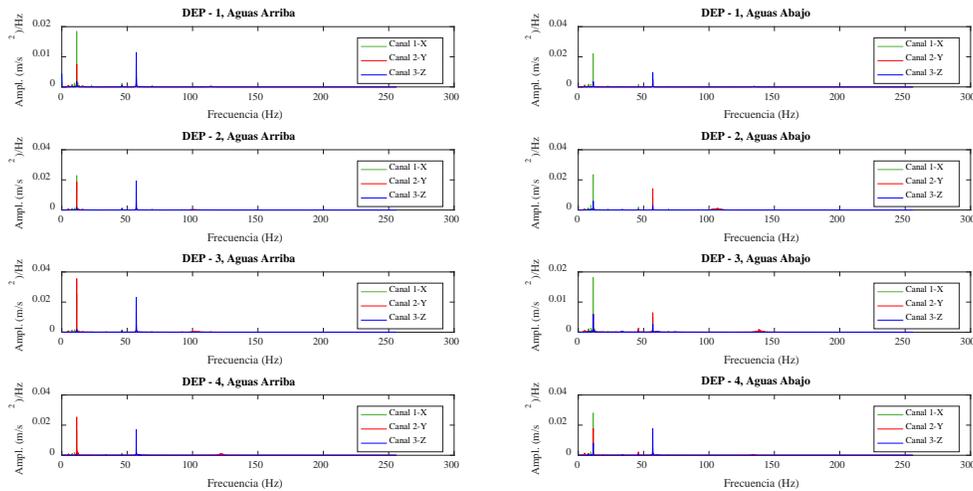


Figura A.48. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C40%, $Q = 40.53$ l/s, SV, parte inferior

Compuerta del 50% de apertura

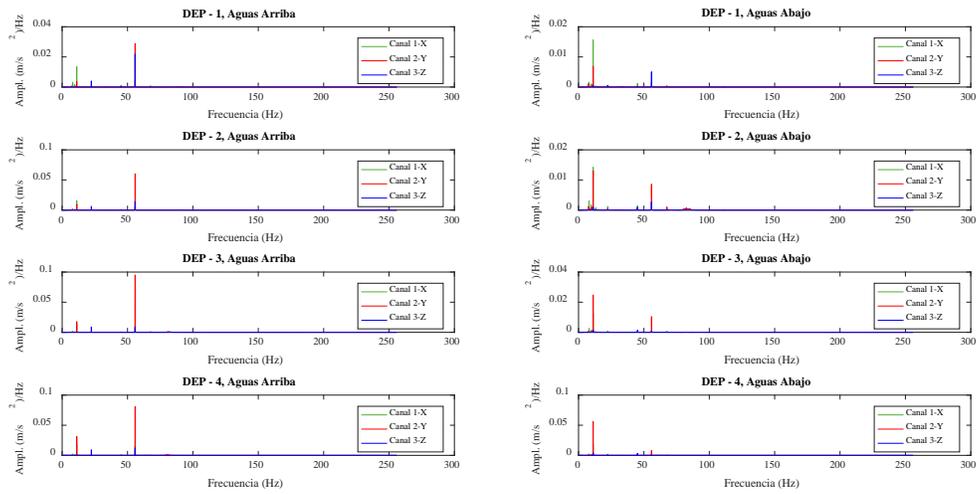


Figura A.49. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, $Q = 40.68$ l/s, SV, parte superior

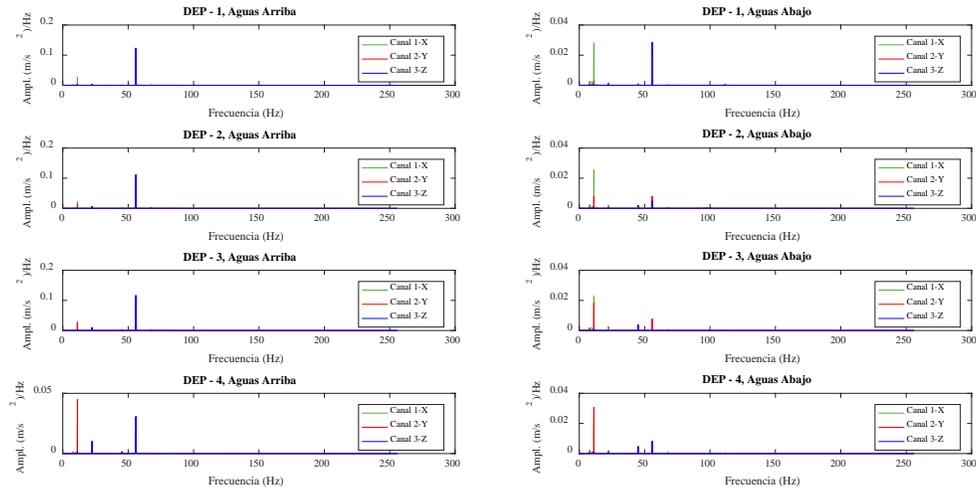


Figura A.50. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, $Q = 40.68$ l/s, SV, parte media

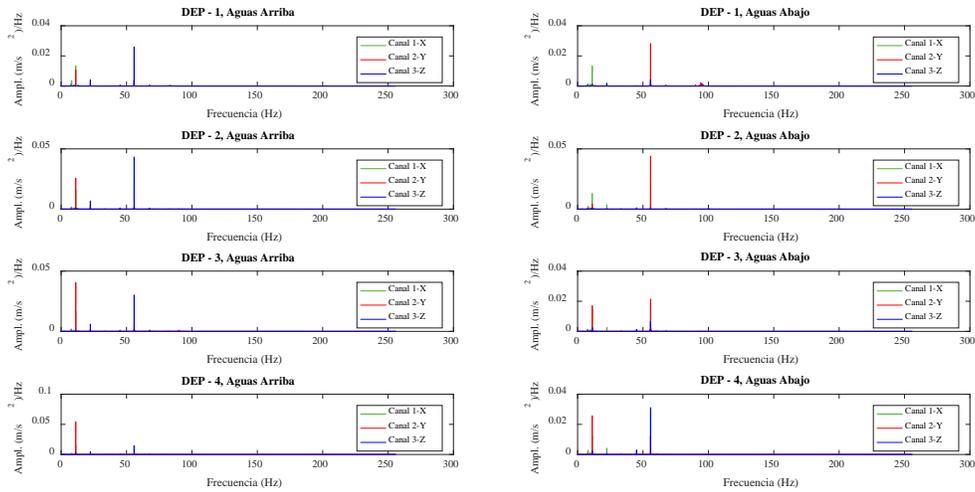


Figura A.51. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C50%, $Q = 40.68$ l/s, SV, parte inferior

Compuerta del 60% de apertura

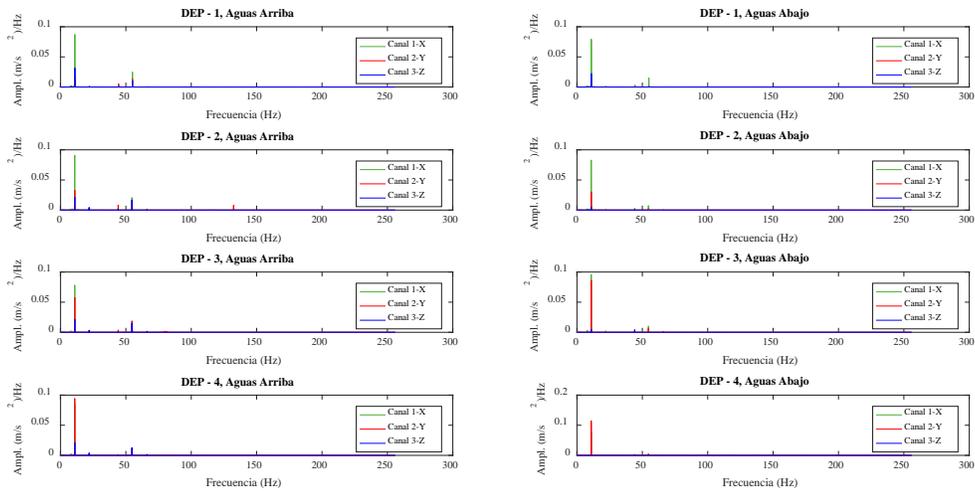


Figura A.52. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, $Q = 40.51$ l/s, SV, parte superior

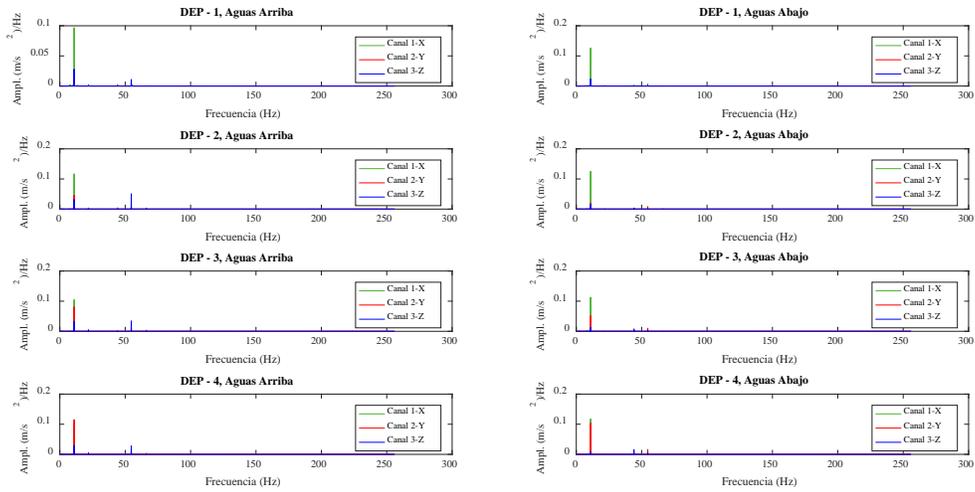


Figura A.53. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, $Q = 40.51$ l/s, SV, parte media

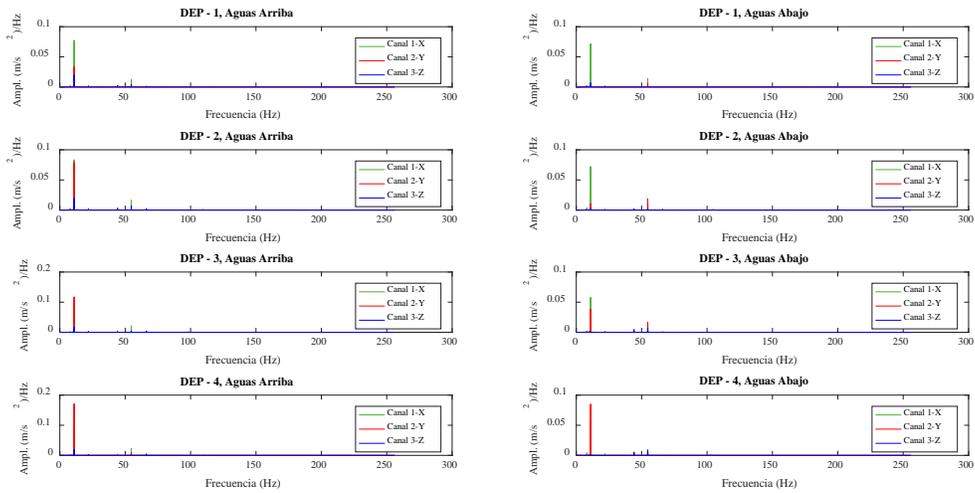


Figura A.54. Densidad espectral de potencia, aguas arriba (a) y aguas abajo (b), C60%, $Q = 40.51$ l/s, SV, parte inferior

Anexo A.5. Desplazamiento promedio

A continuación se presentan las gráficas de desplazamiento promedio correspondientes al capítulo 6.

Flujo a superficie libre (SSH)

Compuerta del 20% de apertura

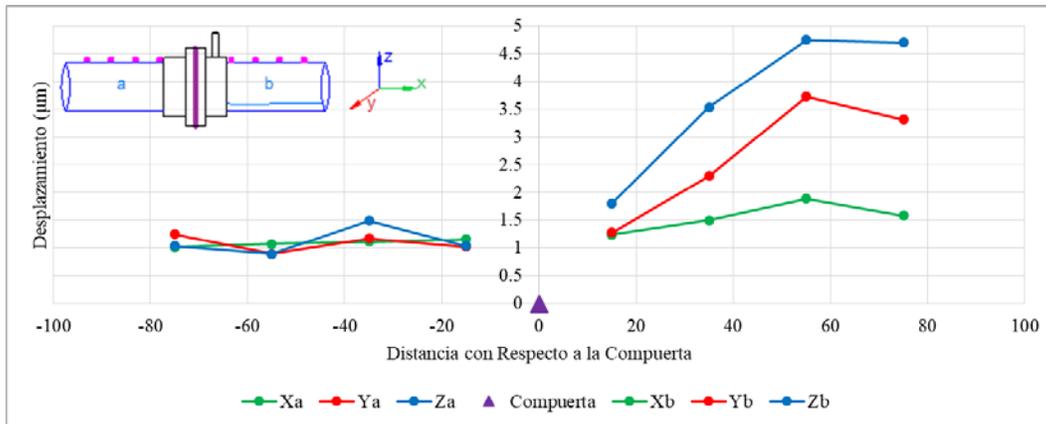


Figura A.55. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46 \text{ l/s}$

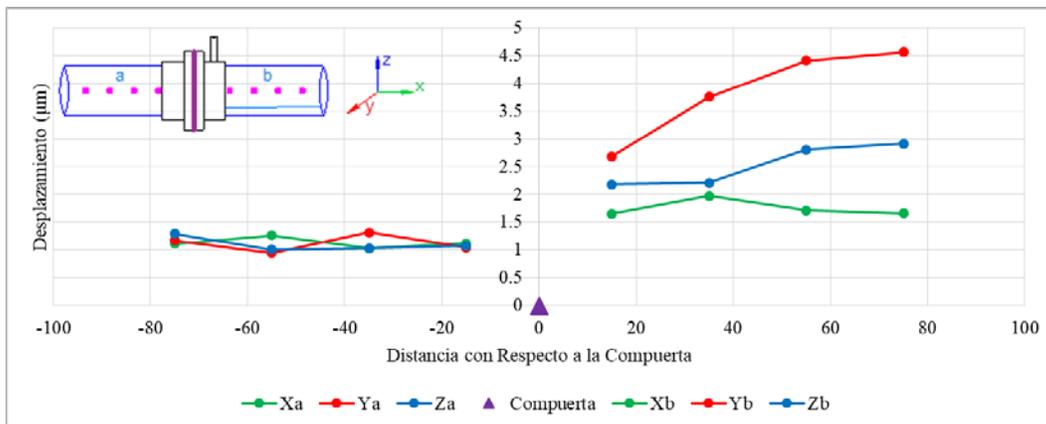


Figura A.56. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46 \text{ l/s}$

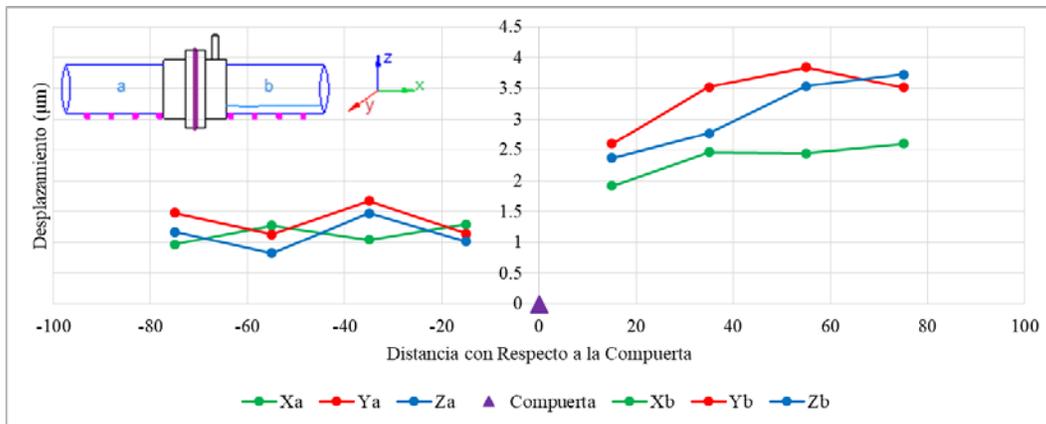


Figura A.57. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SSH, $Q = 40.46 \text{ l/s}$

Compuerta del 30% de apertura

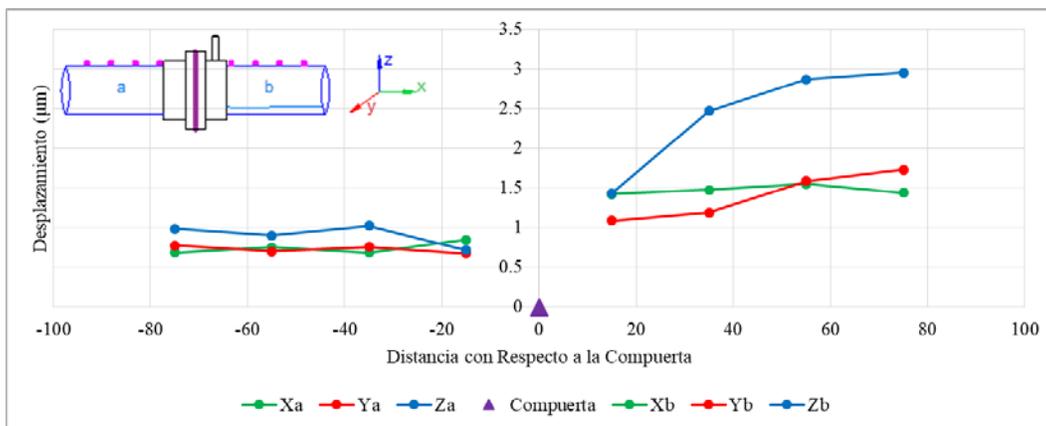


Figura A.58. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56 \text{ l/s}$

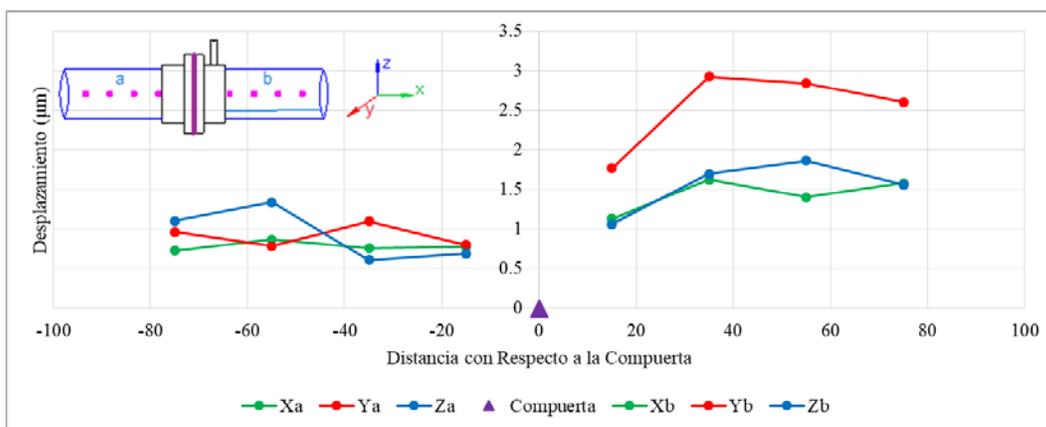


Figura A.59. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, $Q = 40.56 \text{ l/s}$

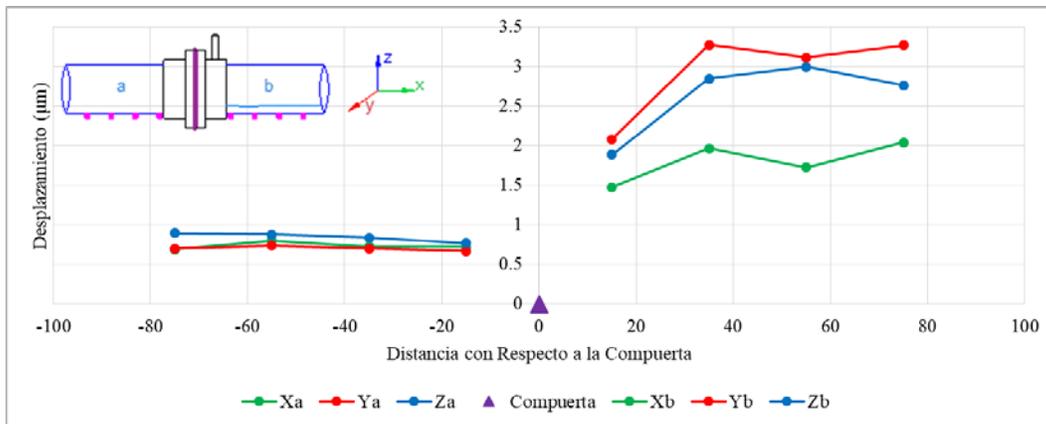


Figura A.60. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SSH, Q = 40.56 l/s

Compuerta del 40% de apertura

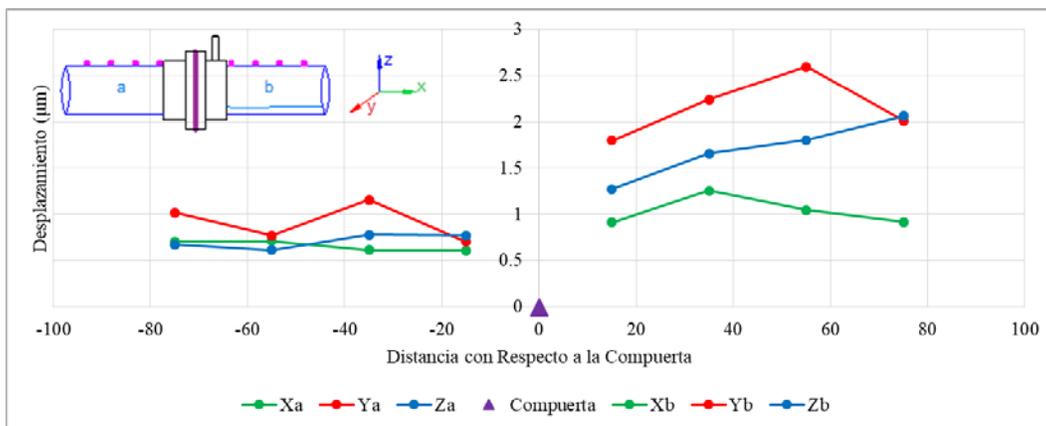


Figura A.61. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, Q = 40.22 l/s

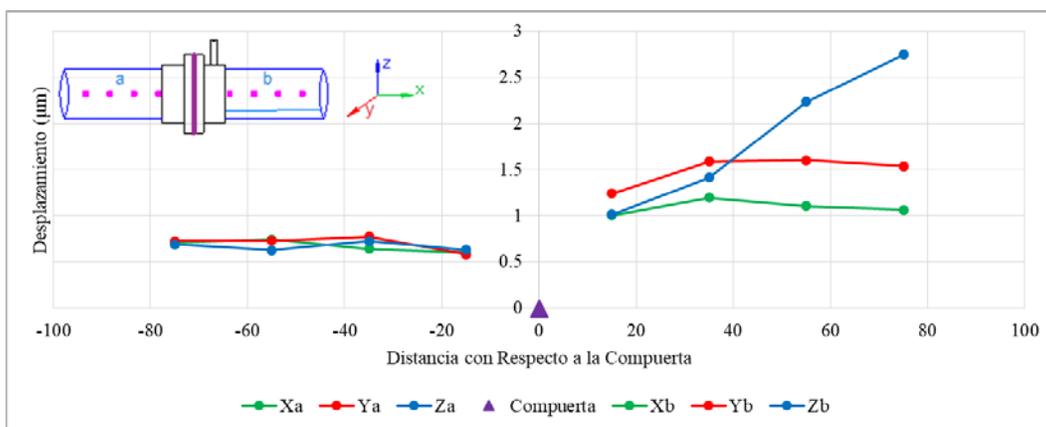


Figura A.62. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, Q = 40.22 l/s

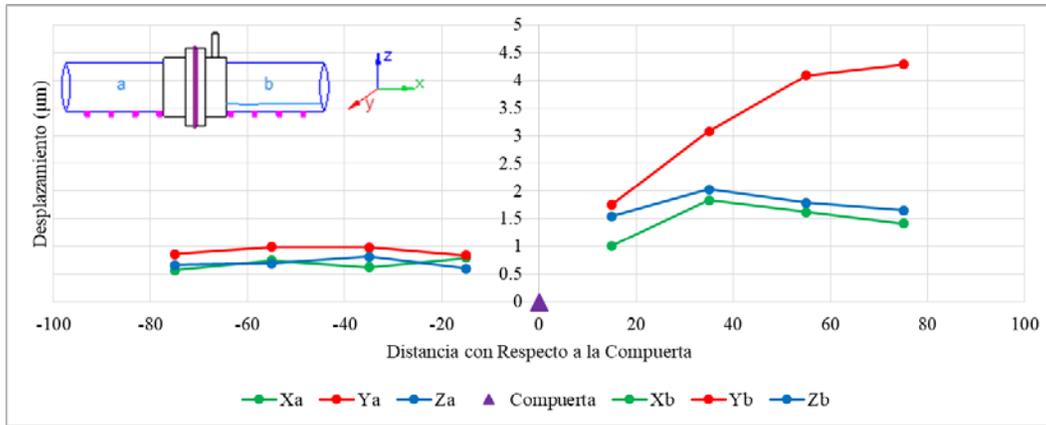


Figura A.63. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SSH, $Q = 40.22 \text{ l/s}$

Flujo con salto hidráulico (CSH)

Compuerta del 10% de apertura

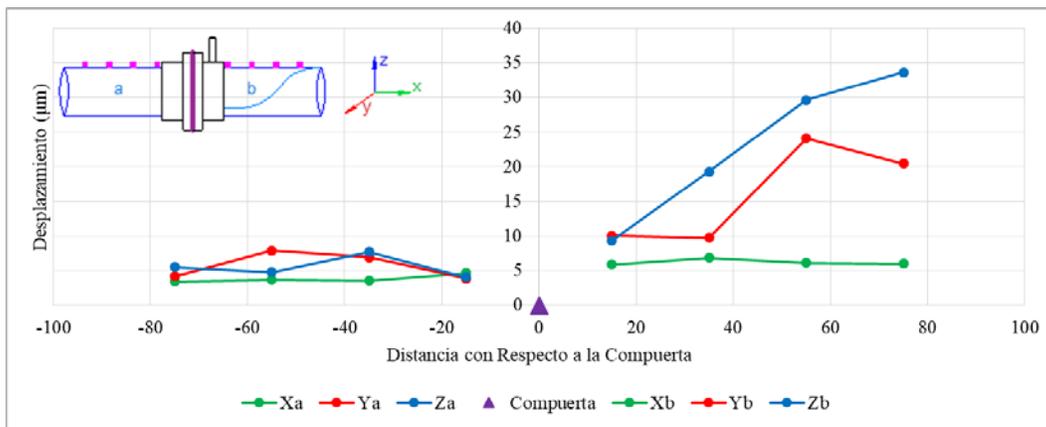


Figura A.64. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24 \text{ l/s}$

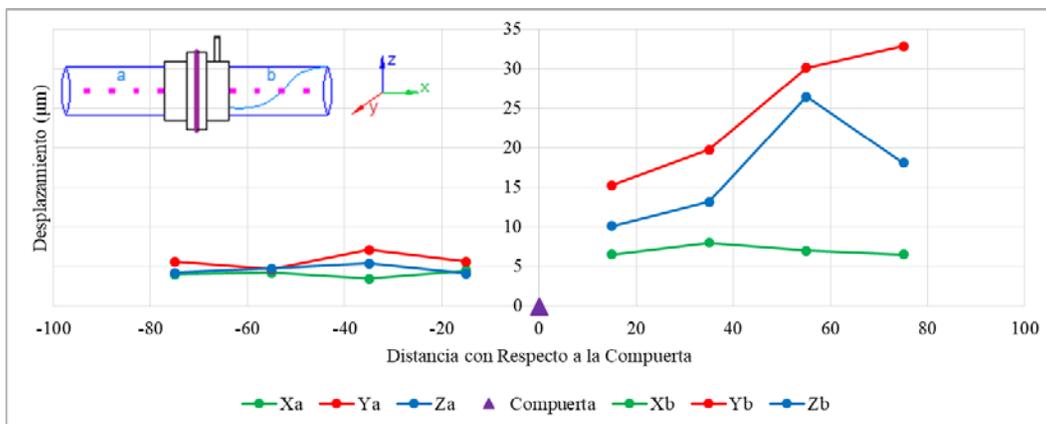


Figura A.65. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24 \text{ l/s}$

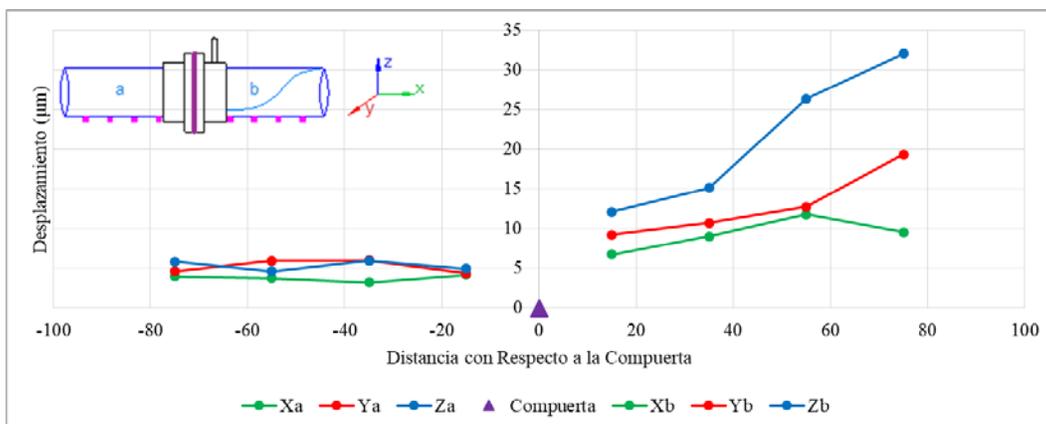


Figura A.66. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, CSH, $Q = 35.24 \text{ l/s}$

Compuerta del 20% de apertura

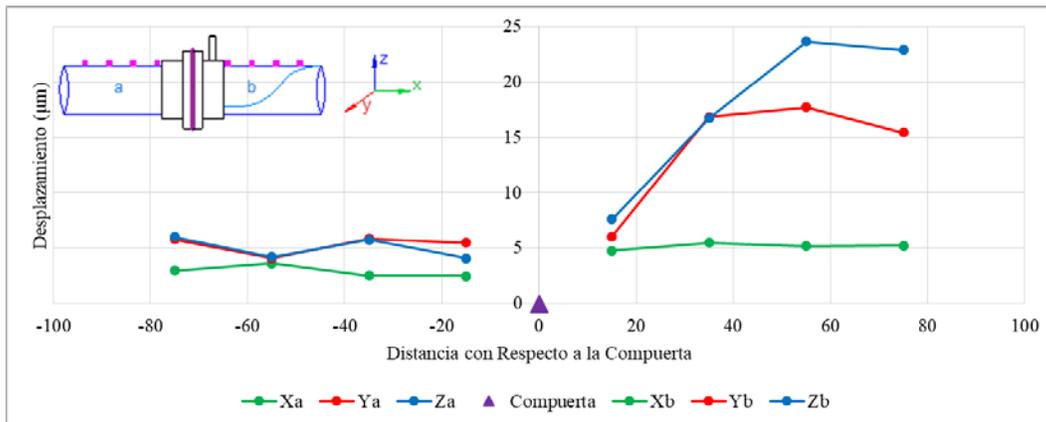


Figura A.67. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36 \text{ l/s}$

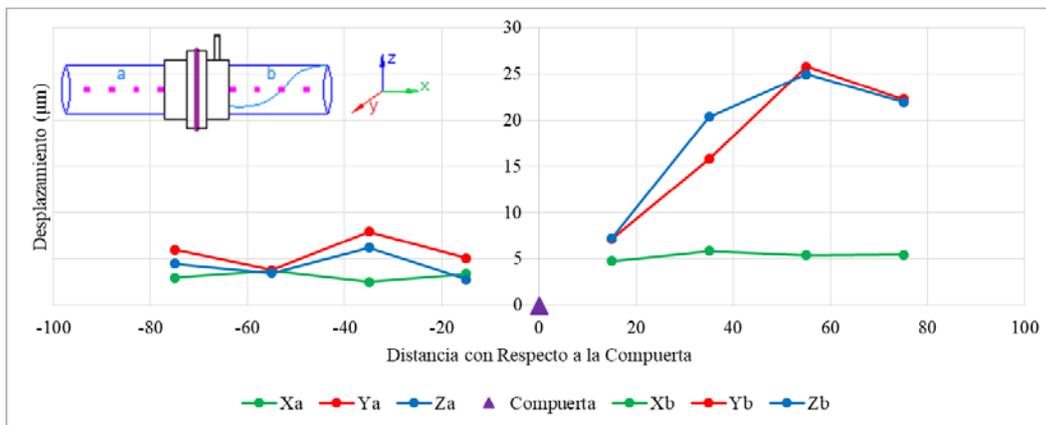


Figura A.68. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36 \text{ l/s}$

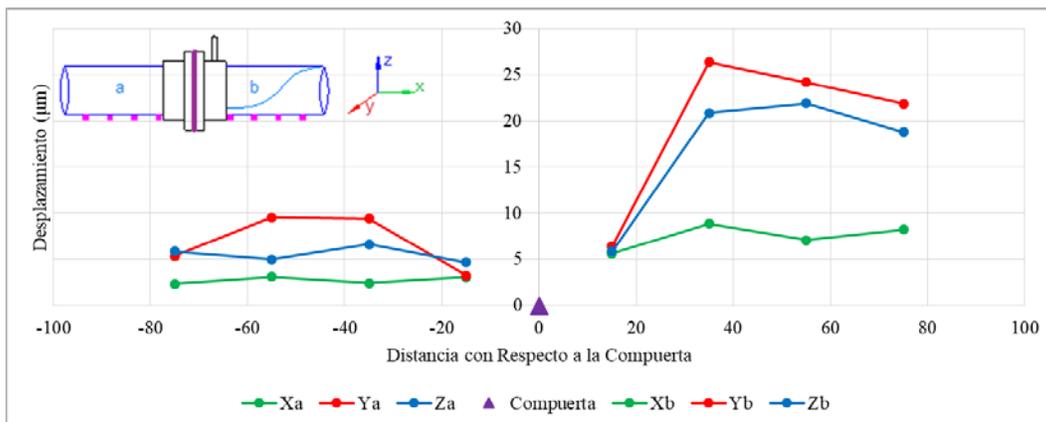


Figura A.69. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, CSH, $Q = 40.36 \text{ l/s}$

Compuerta del 30% de apertura

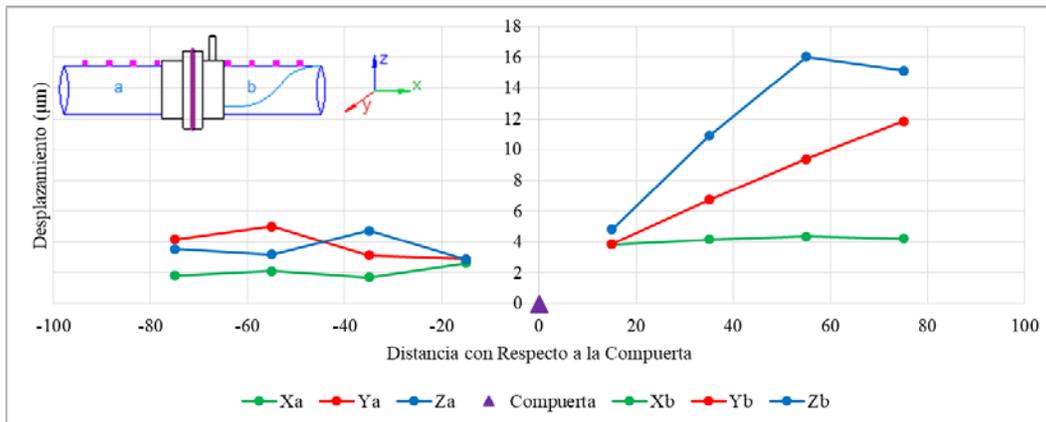


Figura A.70. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23 \text{ l/s}$

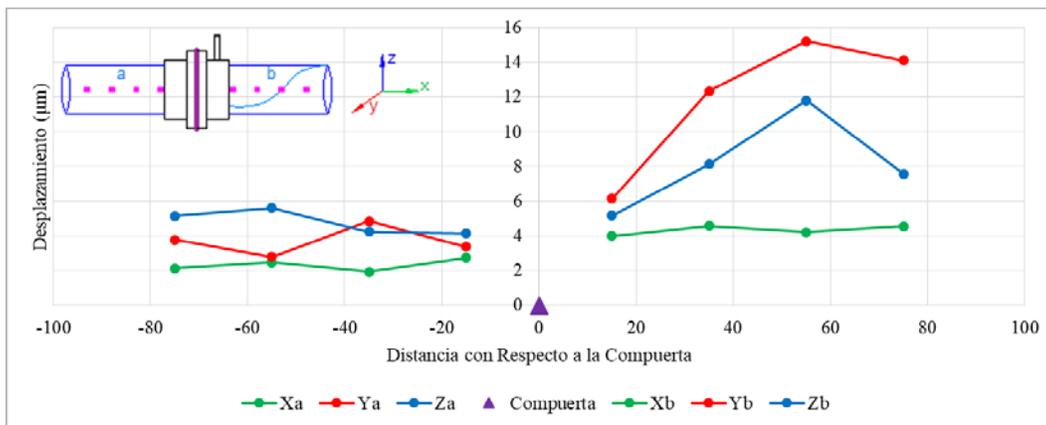


Figura A.71. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23 \text{ l/s}$

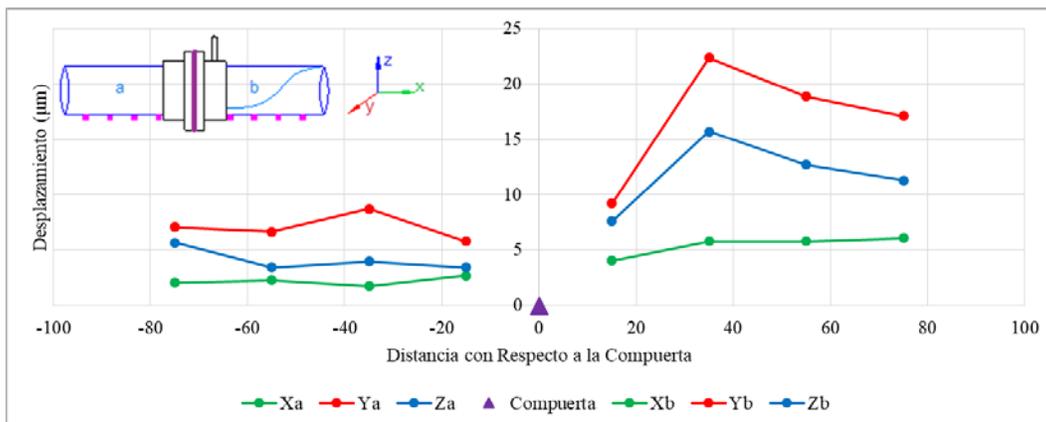


Figura A.72. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, CSH, $Q = 40.23 \text{ l/s}$

Compuerta del 40% de apertura

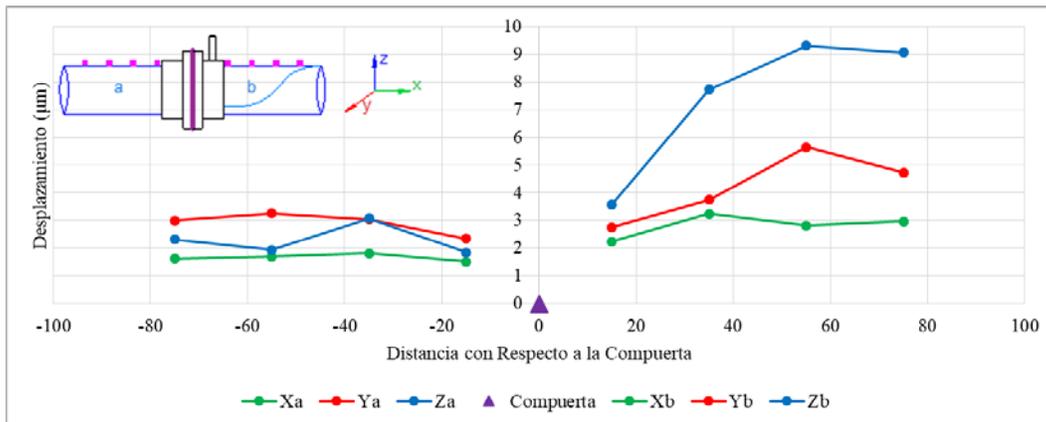


Figura A.73. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26 \text{ l/s}$

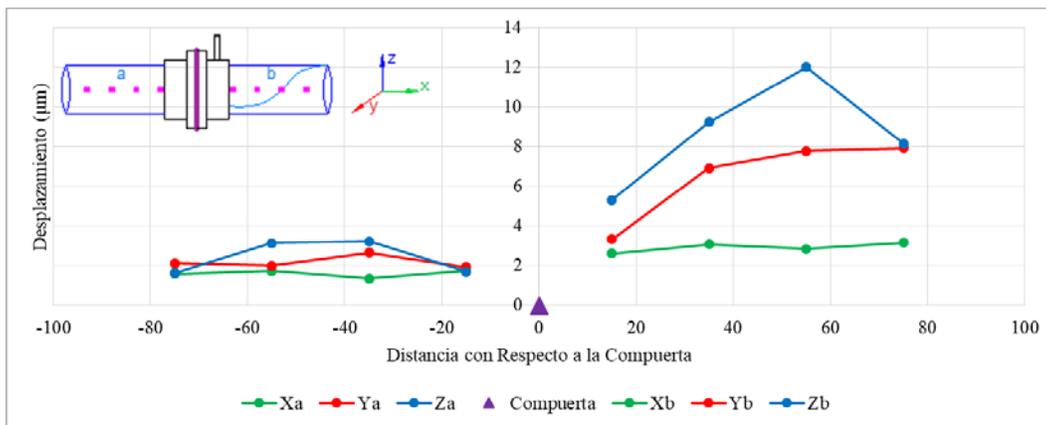


Figura A.74. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26 \text{ l/s}$

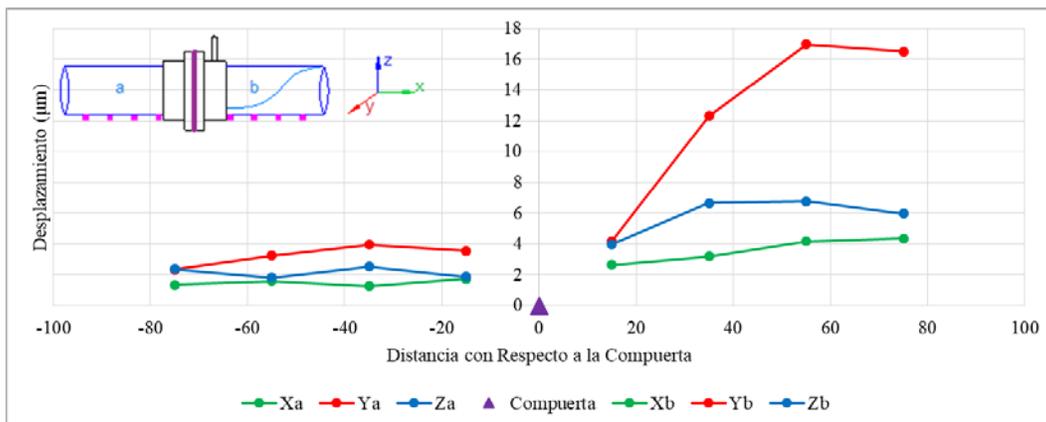


Figura A.75. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, CSH, $Q = 40.26 \text{ l/s}$

Compuerta del 50% de apertura

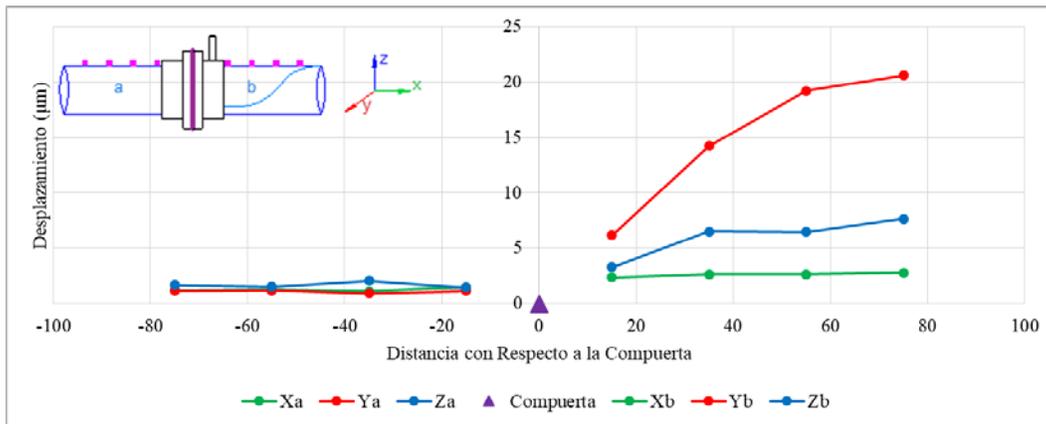


Figura A.76. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73 \text{ l/s}$

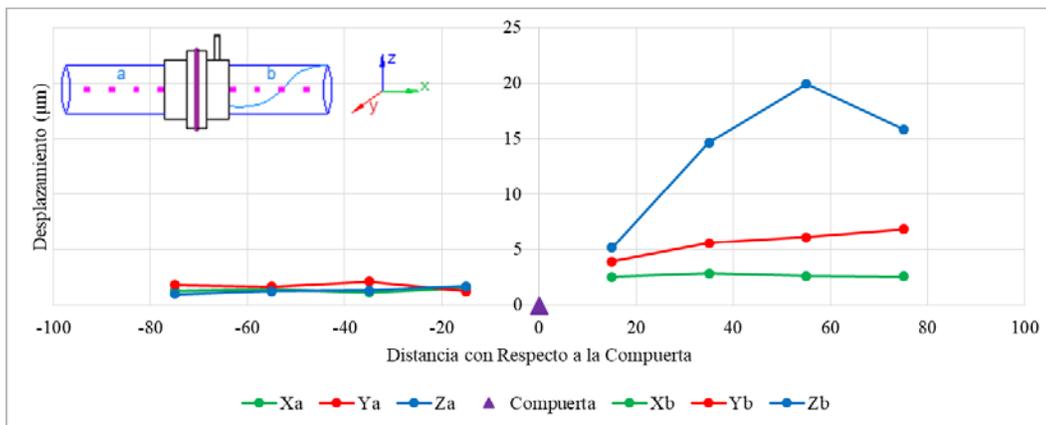


Figura A.77. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73 \text{ l/s}$

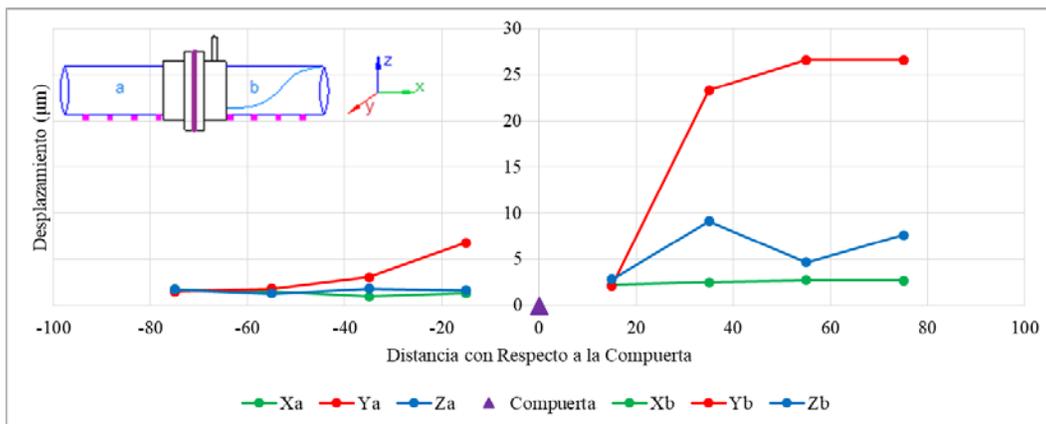


Figura A.78. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, CSH, $Q = 40.73 \text{ l/s}$

Compuerta del 60% de apertura

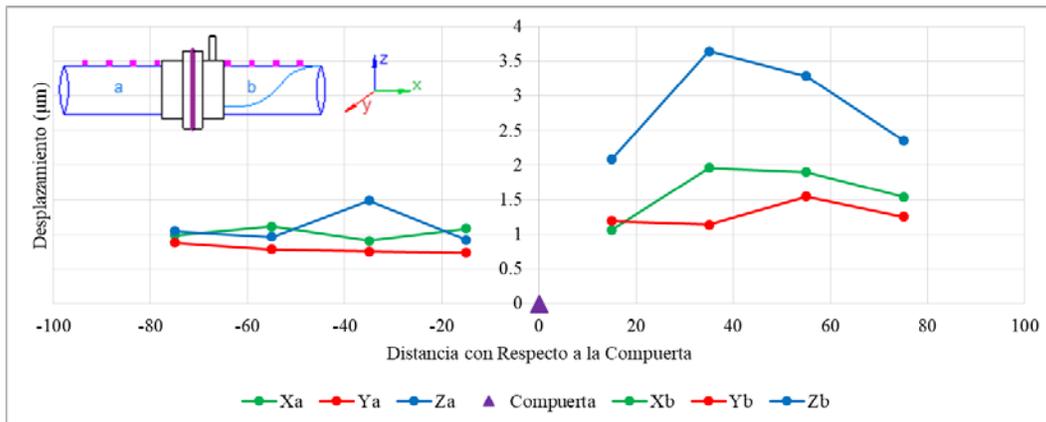


Figura A.79. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

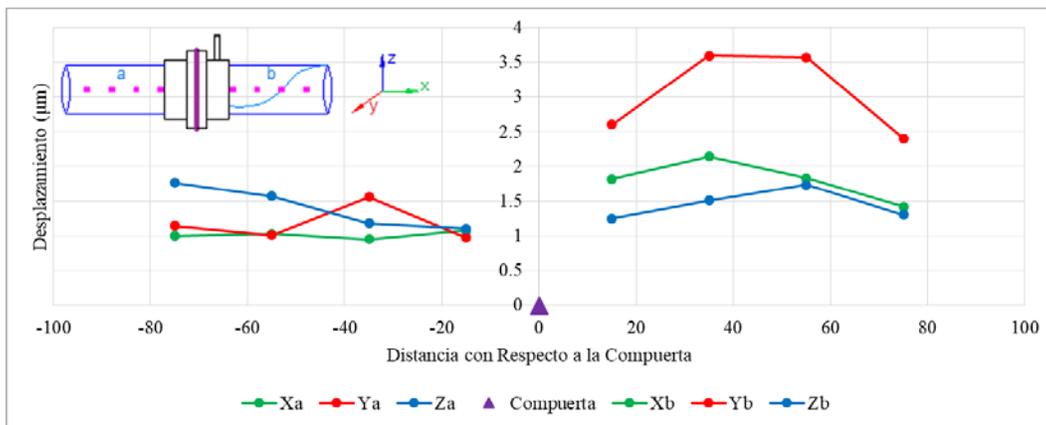


Figura A.80. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

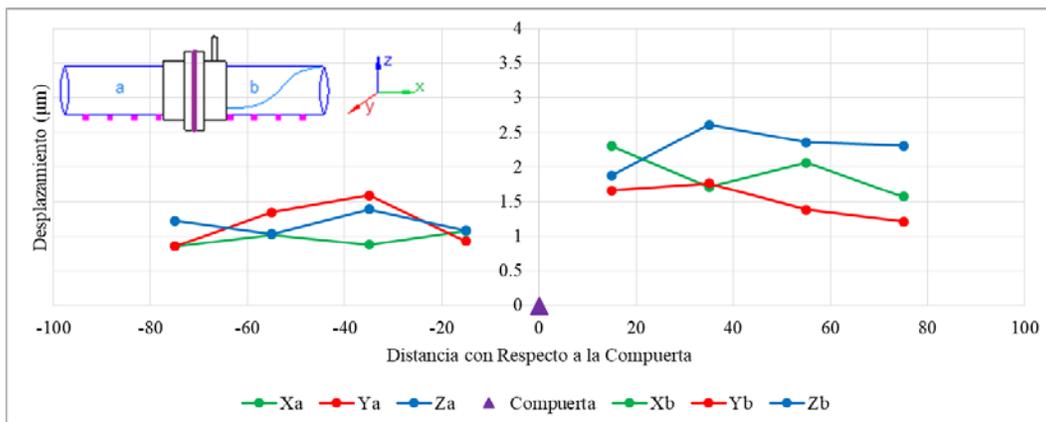


Figura A.81. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, CSH, $Q = 40.70 \text{ l/s}$

Sin dispositivo aireador o venteo (SV)

Compuerta del 10% de apertura

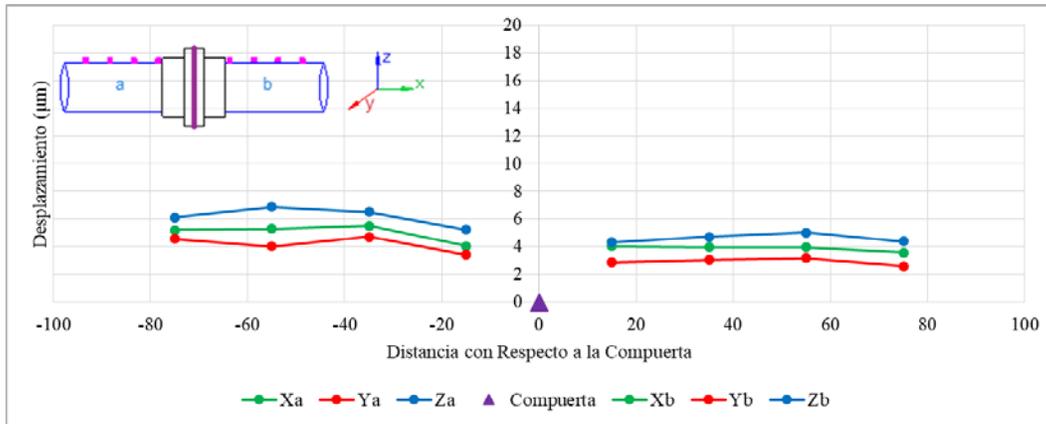


Figura A.82. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, Q = 35.30 l/s

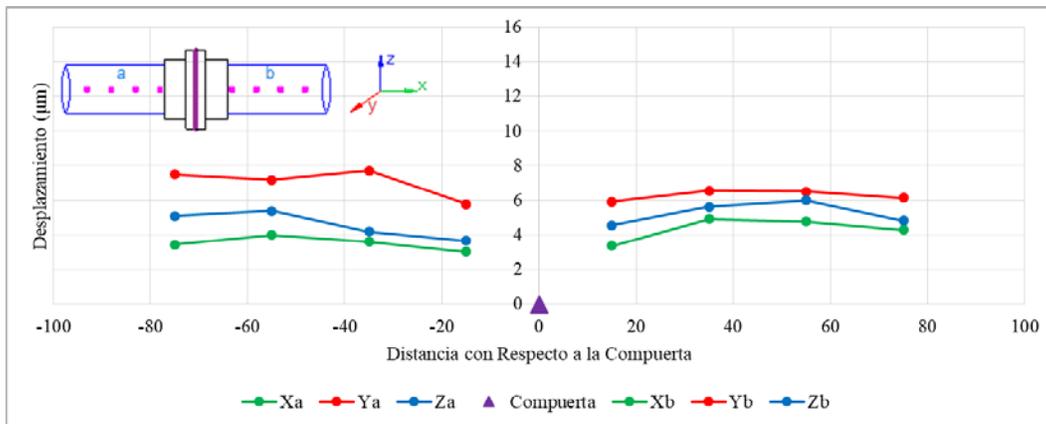


Figura A.83. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, Q = 35.30 l/s

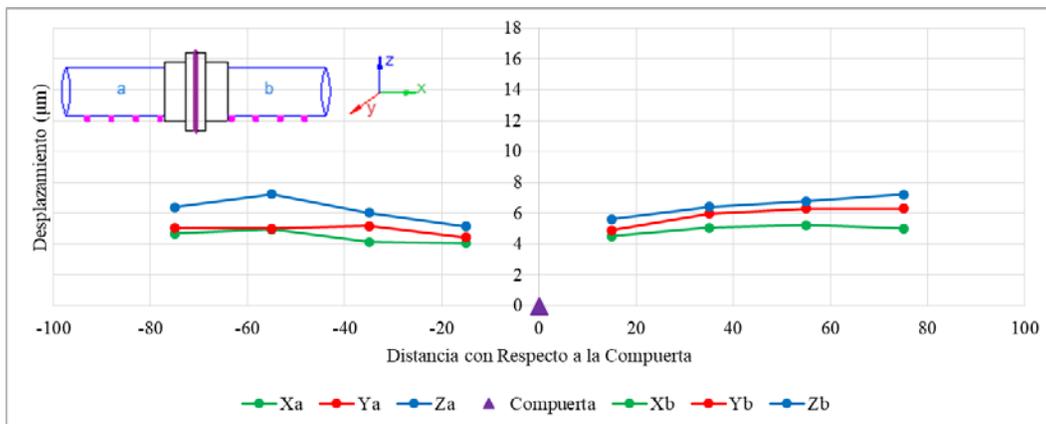


Figura A.84. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 10% de apertura, SV, Q = 35.30 l/s

Compuerta del 20% de apertura

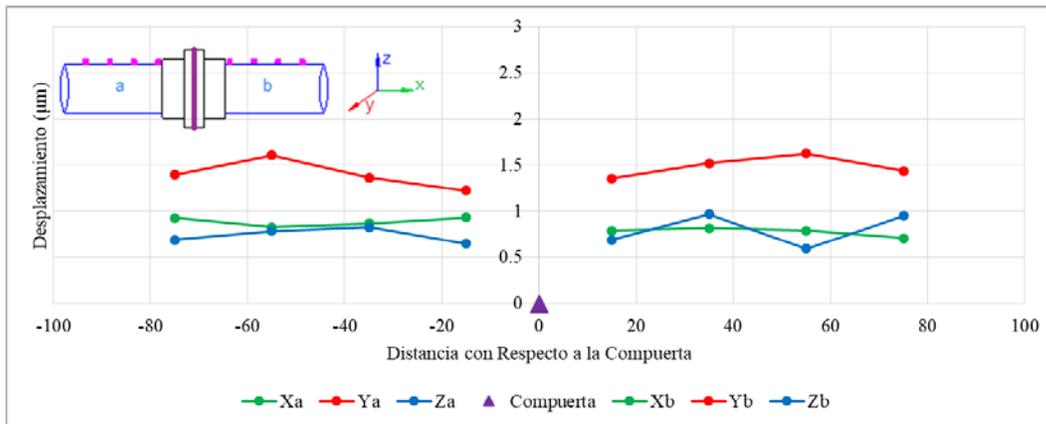


Figura A.85. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, Q = 40.70 l/s

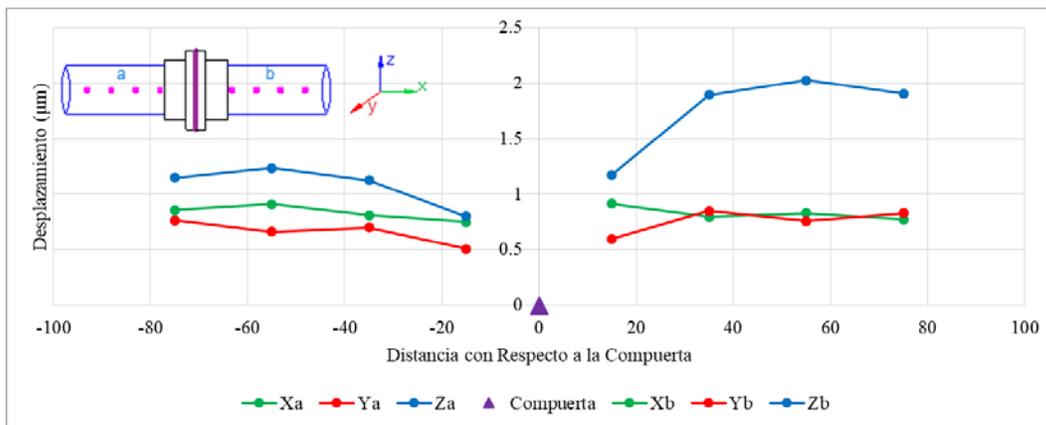


Figura A.86. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, Q = 40.70 l/s

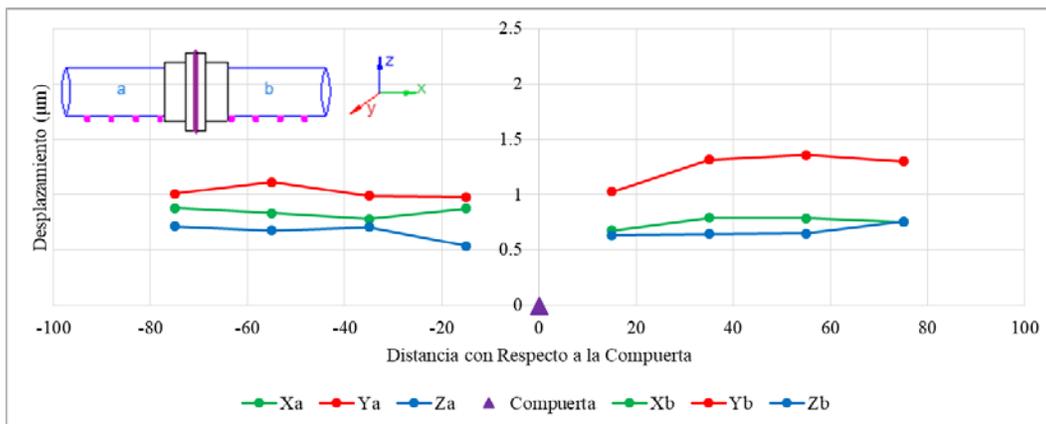


Figura A.87. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 20% de apertura, SV, Q = 40.70 l/s

Compuerta del 30% de apertura

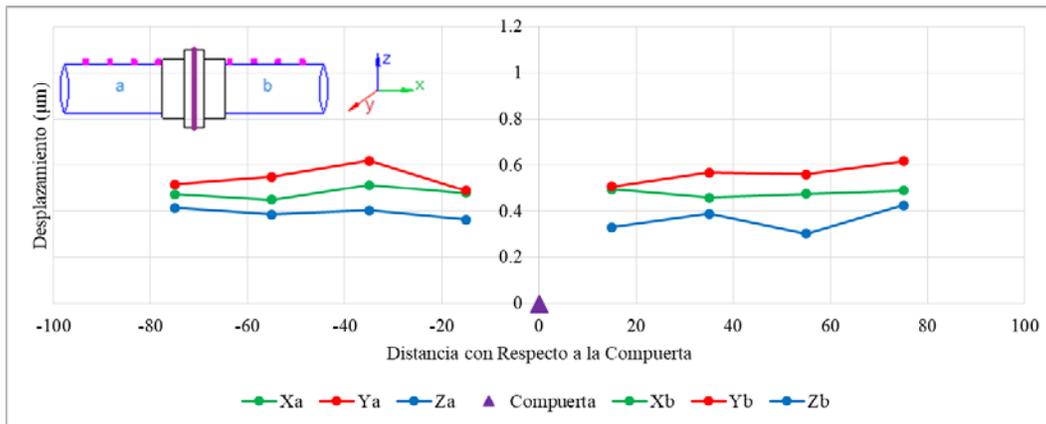


Figura A.88. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, Q = 40.34 l/s

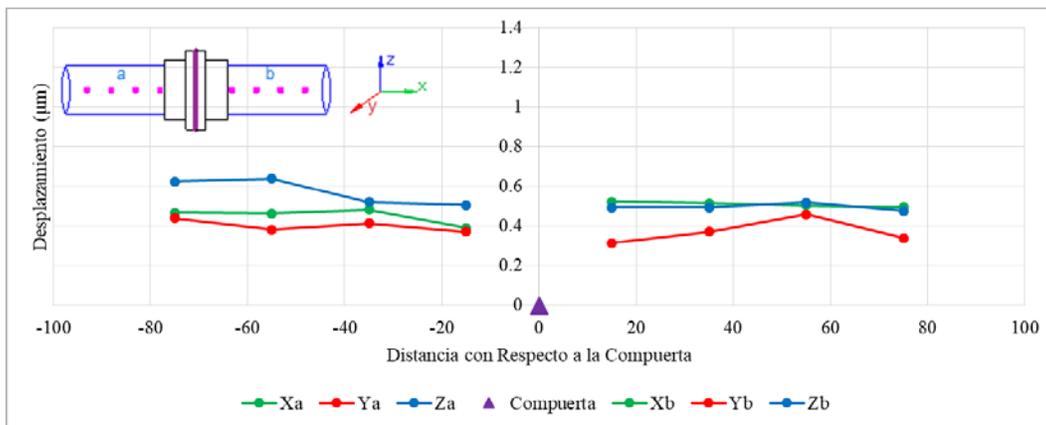


Figura A.89. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, Q = 40.34 l/s

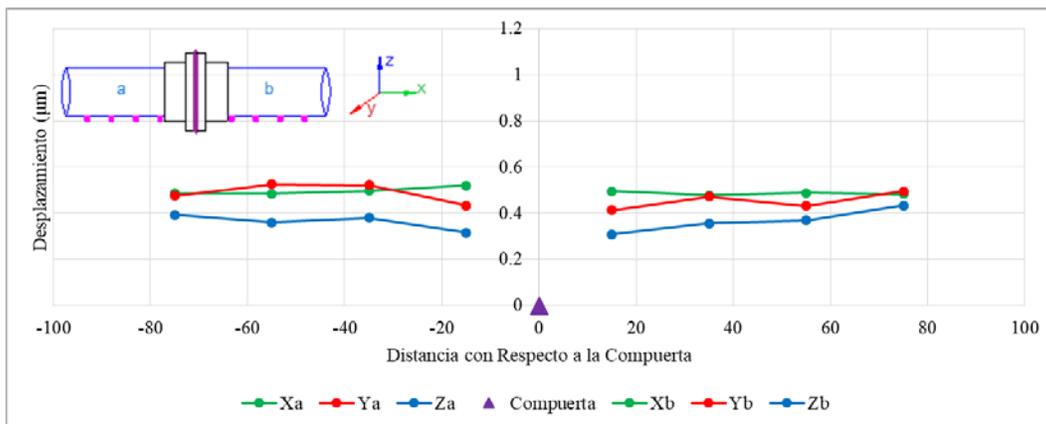


Figura A.90. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 30% de apertura, SV, Q = 40.34 l/s

Compuerta del 40% de apertura

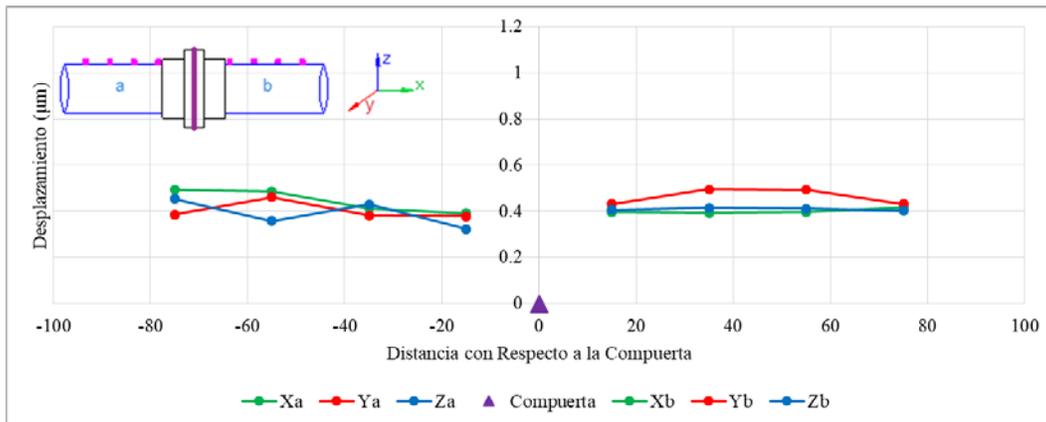


Figura A.91. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, Q = 40.53 l/s

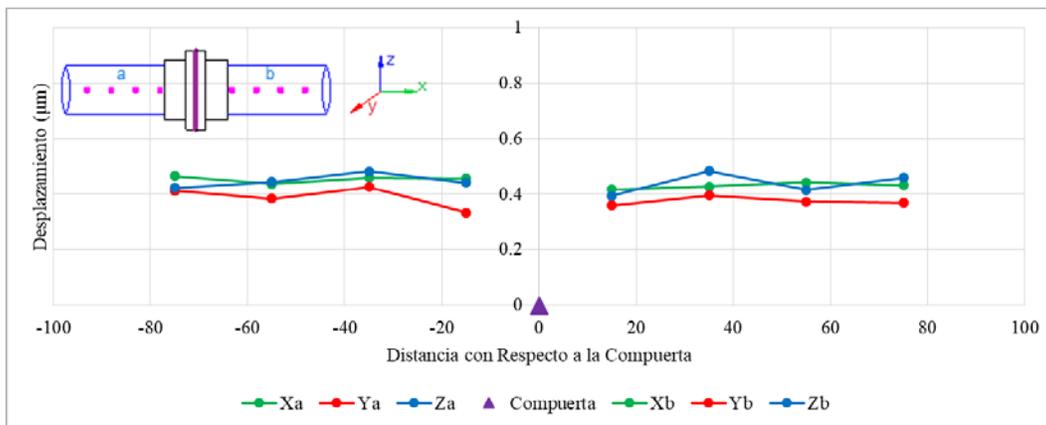


Figura A.92. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, Q = 40.53 l/s

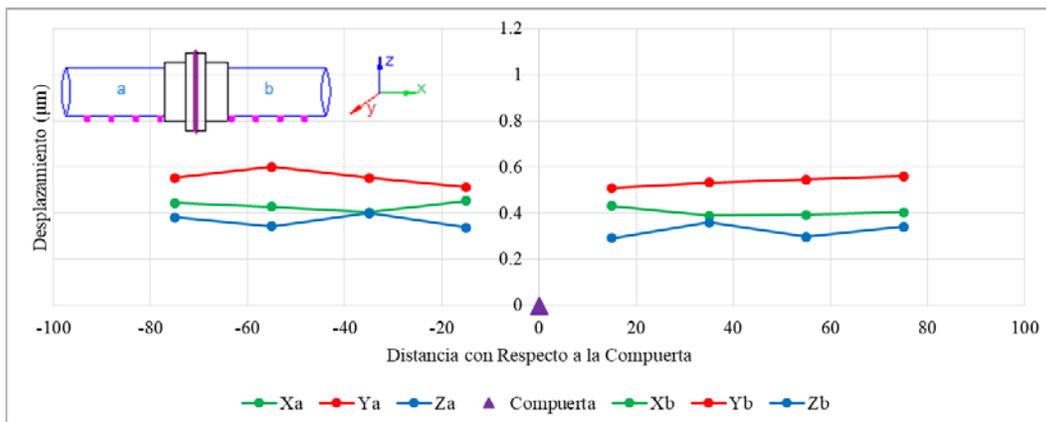


Figura A.93. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 40% de apertura, SV, Q = 40.53 l/s

Compuerta del 50% de apertura

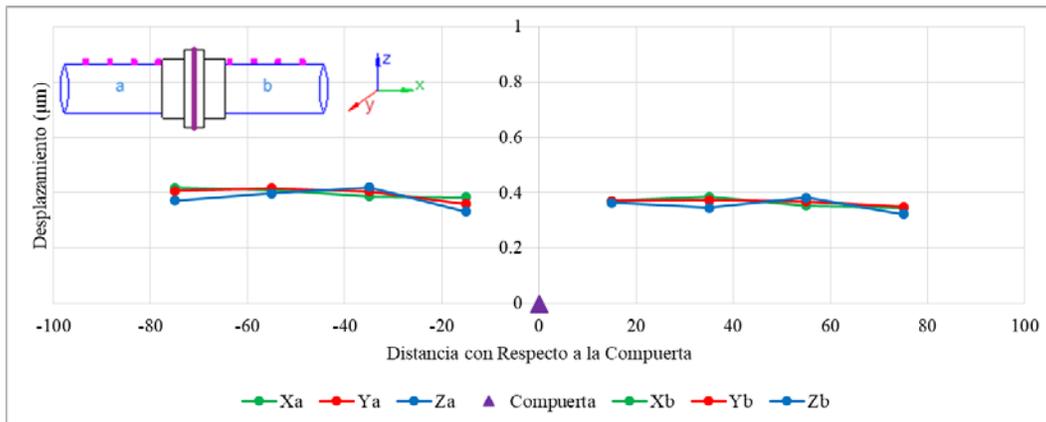


Figura A.94. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, Q = 40.68 l/s

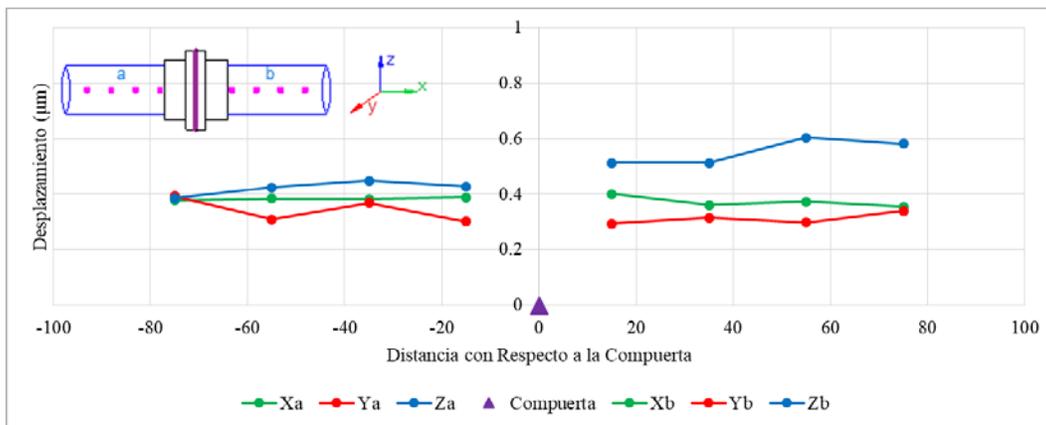


Figura A.95. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, Q = 40.68 l/s

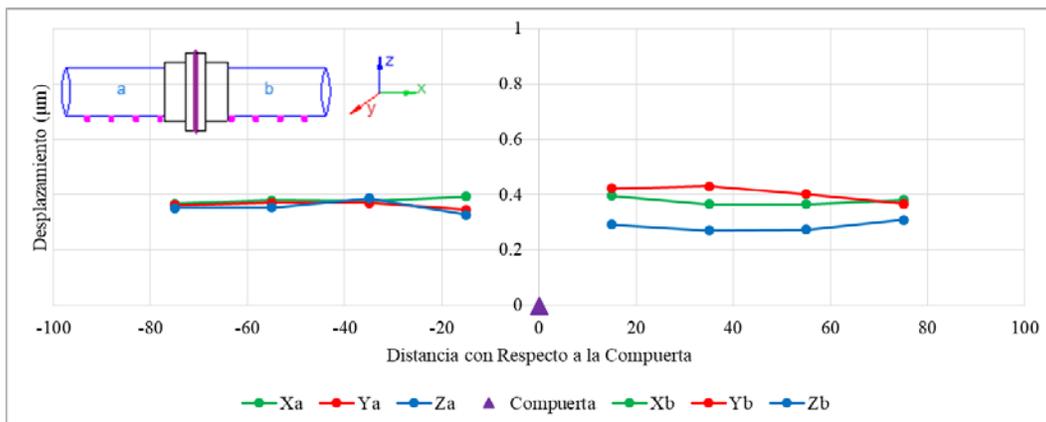


Figura A.96. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 50% de apertura, SV, Q = 40.68 l/s

Compuerta de 60% de apertura

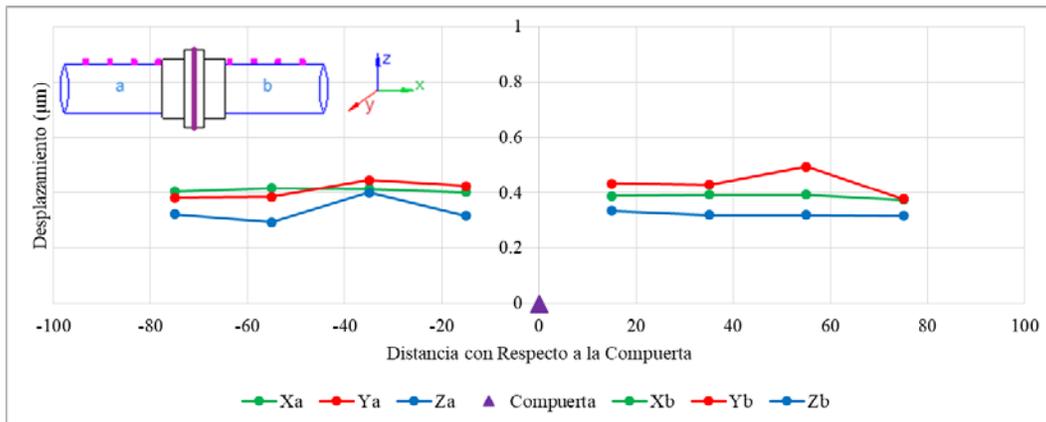


Figura A.97. Desplazamiento promedio en la parte superior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, Q = 40.51 l/s

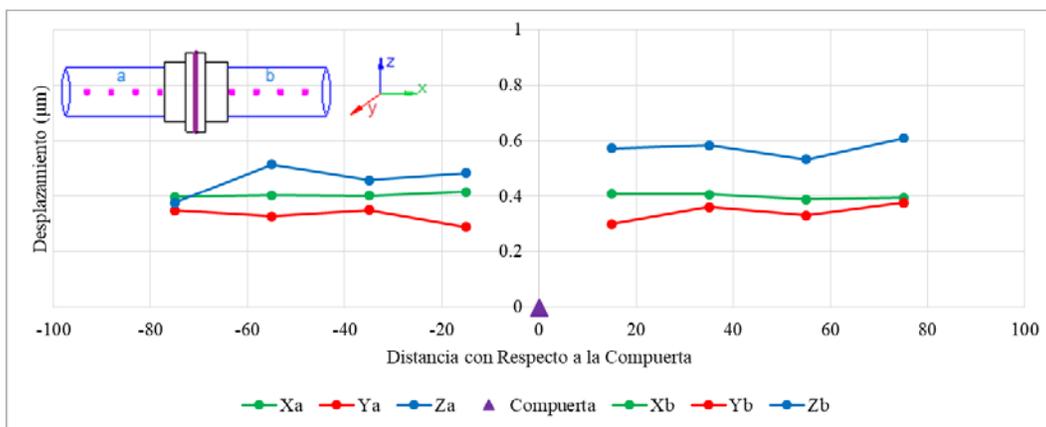


Figura A.98. Desplazamiento promedio en la parte media del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, Q = 40.51 l/s

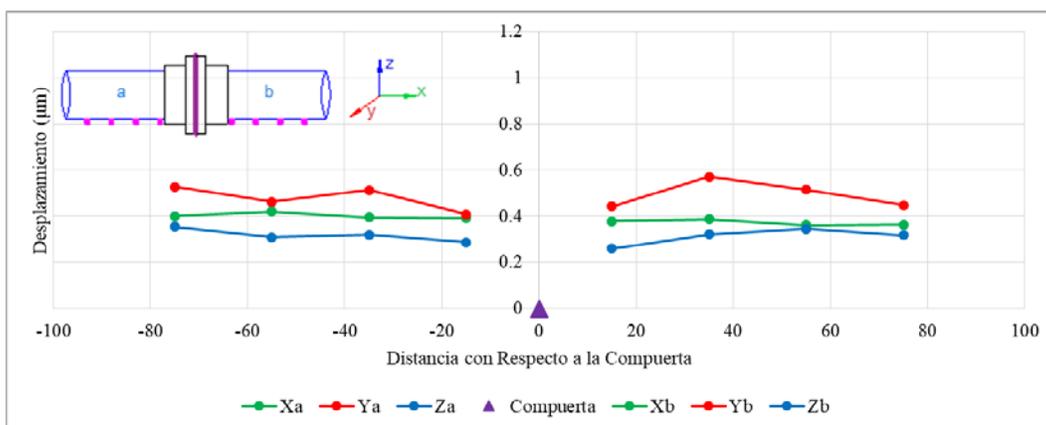


Figura A.99. Desplazamiento promedio en la parte inferior del conducto con la compuerta del 60% de apertura, SV, Q = 40.51 l/s

Bibliografía

ACI-American Concrete Institute (2001), "Control of Cracking of Concrete Structures", ACI Committee 224R-01.

A-MAQ S. A. (2005), "Vibraciones para Mantenimiento Mecánico", Equipos de Medición y Análisis de Vibraciones.

ASHRAE-American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.: ASHRAE Handbook (1981), Fundamentals Volume.

Arndt R. E. (2003), "Cavitation in Fluid Machinery and Hydraulic Structures", St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota.

Bartlett M. S. (1948), "Smoothing Periodograms from Time Series with Continuous Spectra", Nature Vol. 161.

Campbell F. B., Guyton B. (1953), "Air Demand in Gated Outlet Works", Proceedings of the 5th Congress of the International Association of Hydraulic Research, Minnesota.

Chopra A. K. (2014) "Dinámica de Estructuras" Cuarta edición, Pearson Educación, México.

Comité Nacional Español de Grandes Presas (1997). Guía Técnica de Grandes Presas n. 5: Aliviaderos y Desagües, Anejo n. 2 Aireación.

Erbisti Paulo C. F. (2014), "Design of Hydraulic Gates", 2nd Edition, CRC Press/Balkema.

Falvey H. T. (1980), "Air-Water Flow in Hydraulic Structures", Engineering Monograph n. 41, Water and Power Resources Engineering and Research Center, Denver, EEUU.

Falvey H. T. (1990), "Cavitation in Chutes and Spillways", United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

Gómez G. M. P. (2017), "Filtros Digitales", Coordinación de Computación, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE, México.

González de la Aleja S. M., "Los desagües de fondo en presas", Comité Nacional Español de Grandes Presas, HidroSanco SL.

Graham C. J., Creegan P. J., Hamilton W. S., (1988), "Erosion of Concrete in Hydraulic Structures", American Concrete Institute, ACI 210.

Houston K. H., Quint R. J., Rhone T. J. (1987), "Hoover Dam Tunnel Spillway Damage", United States Bureau of Reclamation, ASCE.

Jacobs F., Winkeler W., Hinkeler F., Volkart P. (2001), “Betonabrasion im Wasserbau” VAW-Mitteilung 168, ETH Zurich, Switzerland.

Kalinske A. A. y Robertson J. M. (1943), “Closed Conduit Flow”, Transactions of the Symposium on Entrainment for Air in Flowing Water, ASCE, Vol 108.

Levin L. (1965), “Calcul Hydraulique des Conduits d’Aeration des Vidanges de Fond et Dispositifs Deversants”, La Houille Blanche, n. 2.

Lian J., Zehng Y., Liang C. and Ma B. (2019), “Analysis for the Vibration Mechanism of the Spillway Guide Wall Considering the Associated-Forced”, State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin, China.

Marchegiani A.R. (2006), “Cavitación”, Departamento de Mecánica Aplicada, Universidad Nacional del Comahue, Argentina.

Márquez F. J. (2014), “Ruido”, CCADET-ICAT, Universidad Nacional Autónoma de México.

Müller-Hagmann M. (2017), “Hydroabrasion in High Speed Flow at Sediment Bypass Tunnels”, VAW-Mitteilung 239, ETH Zurich, Switzerland.

Pozo D., Salazar F., Toledo M.A. (2014), “Modelación del funcionamiento hidráulico de los dispositivos de aireación de desagües de fondo de presas mediante el método de partículas y elementos finitos”, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería.

Pugh C. A. and Rhone T. J. (1988), “Cavitation in Bureau of reclamation Tunnel Spillways”, The international symposium on hydraulics for high dams, Denver, Colorado.

Quiroz C. G. (2007), “Laboratorio Analógico”, Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica, Universidad de las Américas Puebla.

Rodríguez R. G. (1995), “Métodos de Análisis Espectral del Oleaje”, Departamento de Física, Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Seguel Plaza. F. J. (2014), “Caracterización Experimental de las Vibraciones Producidas por Saltos Hidráulicos en una Tubería”, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.

Sharma (1976), “Air-Entrainment in High Gated Conduits”, Journal of the Hydraulics Division, ASCE 102 (HY11), 1629-1646.

Sotelo A. G. (1997). “Hidráulica General, volumen 1”, Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores, México.

Thompson A. S. (2009), “Experimental Characterization of Flow Induced Vibration in Turbulent Pipe Flow”, MSc Thesis, Brigham Young University.

Torres Herrera F. (1987), “Obras Hidráulicas”, 2da. Edición, Editorial Limusa.

U.S. Army Corps of Engineers (1964), “Hydraulic Design Criteria: Air Demand, Regulated Outlet Works”, Sheet 050-1.

Vaccaro D. y Ocón A-C. (2007), “Física, Material Autoinstruccional”, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional.

Veesaert C. J. (2007). “Inspection of Spillways, Outlet Works and Mechanical Equipment”; Bureau of Reclamation, Session XVI.

Wang X., Hu Y., Luo S., Zhang L., Wu B. (2017), “Prototype Observation and Influencing Factors of Environmental Vibration Induced by Flood Discharge, Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, China.

Warren K.F. (2012), “Cavitation in Hydraulic Structures-Bridging the Gap Between the Laboratory and the Real World”, International junior researcher and engineer workshop on hydraulic structures, Utah State University.

Welch P. D. (1967), “The use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging over Short, Modified Periodograms”, IEEE Trans, Audio and Electroacust., Vol. AU-15, pp.70-73.

White F. M. (2008), “Mecánica de Fluidos”, Sexta Edición, Editorial McGraw-Hill

White G. (1990-2010), “Introducción al Análisis de Vibraciones”, Primera edición, Azlma DLI, Estados Unidos.