



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

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS
POR SALTOS HIDRÁULICOS EN UNA TUBERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCISCO JAVIER SEGUEL PLAZA

PROFESOR GUÍA:
VIVIANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE
2014

Resumen

El presente trabajo de título, de carácter experimental, trata sobre la descripción y estudio de las vibraciones producidas por saltos hidráulicos (SH) en una tubería, temática que hasta la fecha no ha sido abordada desde el punto de vista de las vibraciones mecánicas.

Los estudios se realizan en una instalación diseñada y construida para forzar la aparición del salto hidráulico para cuatro razones de llenado diferentes en una tubería de diámetro interno $1 \frac{3}{4}$ de pulgada. Esta instalación consiste en una bomba centrífuga, un tramo vertical de alimentación, un tramo horizontal en donde se produce el SH, un tramo de descarga y un estanque, conectados como un circuito cerrado en donde el agua recircula. Para medir las vibraciones se utilizan acelerómetros piezoeléctricos dispuestos de manera axial en la tubería de pruebas. Se mide la respuesta de vibración para distintos niveles de agua. Se determinan cinco modos para la tubería de pruebas para tres niveles de agua distintos, concluyendo que el aumento en la cantidad de agua disminuye las frecuencias naturales de algunos modos y produce la aparición de otros. Por otra parte, se estudia el espectro de las vibraciones producidas en el funcionamiento de la bomba, constatándose diversos peaks característicos en múltiplos de la frecuencia de rotación del motor.

Se realizan mediciones con y sin la aparición del salto hidráulico en la tubería de pruebas, para dos razones de llenado. El análisis de los espectros obtenidos, a través de la gráfica de la densidad de potencia espectral, muestra varias diferencias entre los ensayos con y sin salto. En las vibraciones producidas por los saltos hidráulicos se comprueba, a altos números de Froude, el ajuste a la ley de decaimiento $f^{-5/3}$ características de las vibraciones producidas por turbulencia en tuberías presurizadas. Por otra parte, se observa la excitación de diversos modos de la tubería en la evolución del salto hidráulico.

Se estudia la evolución del valor RMS de la aceleración de las paredes de la tubería en función del número de Froude para cada razón de llenado. Se obtiene que el valor RMS de las vibraciones varía linealmente con el número de Froude. Por otra parte, se observa que el valor RMS de las vibraciones también crece con la razón de llenado. Al comparar las gráficas obtenidas para ensayos con y sin salto se obtiene que el salto hidráulico juega el rol de “amplificar” las vibraciones en la tubería ya que las vibraciones en los ensayos sin salto muestran un comportamiento similar en cuanto a linealidad y tendencia. Finalmente, se estudia el efecto de disminuir la distancia entre los soportes de la tubería de pruebas, teniéndose como resultado una disminución en el nivel de las vibraciones registradas.

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda colaboraron en la realización de este trabajo, en especial al Dr. Viviana Meruane Naranjo, profesora guía de esta investigación, por la orientación, seguimiento y supervisión continua en el desarrollo de este trabajo de título, pero por sobre todo por su apoyo y disposición a lo largo de este proceso.

Quisiera también hacer extensiva mi gratitud al Dr. Williams Calderón Muñoz y al Dr. Ramón Frederick González, por aceptar formar parte de la comisión y por su disposición y colaboración en el desarrollo del trabajo de título, y también a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica, especialmente al Sr. Javier Sánchez Moretti, con quien compartí el proceso de realización del trabajo de título, por su amistad, apoyo y cooperación en la realización de esta investigación, y al Sr. Hernán Nilo Vásquez, por su amistad y compañía durante toda mi estancia en la Universidad.

También quiero dar las gracias a mi familia, y especialmente a mi compañera la Srta. Andrea Hidalgo Núñez, por toda la comprensión, paciencia y ánimos recibidos.

A todos ellos,

Muchas gracias.

Tabla de contenido

1	Introducción y objetivos.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos.....	1
1.2.1	Objetivo general	1
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
2	Antecedentes	3
2.1	Salto hidráulicos en tuberías circulares	3
2.1.1	Ecuaciones básicas.....	4
2.1.2	Flujo crítico	8
2.1.3	Razón de profundidad secuencial.....	10
2.1.4	Condición de “choking”	12
2.1.5	Tipos de salto hidráulico y apariencia [1]	13
2.2	Vibraciones mecánicas	15
2.2.1	Análisis espectral.....	15
2.2.2	Vibraciones por turbulencia en tuberías: Flujo Interno	21
2.2.3	Medición experimental.....	24
3	Montaje Experimental	28
3.1	Instalación.....	28
3.1.1	Selección del diámetro de la tubería de pruebas	30
3.1.2	Placas perforadas.....	31
3.1.3	Construcción.....	31
3.2	Instrumentación	34
4	Metodología	35

4.1	Caracterización de las vibraciones	35
4.2	Procedimiento experimental	36
5	Resultados	40
5.1	Ensayo de Impacto	40
5.2	Análisis del espectro de la bomba centrífuga en funcionamiento	47
5.3	Vibraciones producidas por saltos hidráulicos	49
5.3.1	Densidad de potencia espectral.....	49
5.3.2	Aceleración como función del número de Froude	74
5.3.3	Influencia de la distancia entre soportes en el nivel de vibraciones	76
6	Conclusiones	77
6.1	Análisis Espectral.....	77
6.2	Nivel de vibraciones y distancia entre soportes	78
6.3	Comentarios Finales	79
7	Bibliografía	80

Índice de tablas

Tabla 3-1: Profundidad de entrada h_1 y caudal de <i>Choking</i> Q_c para distintas razones de llenado f	30
Tabla 3-2: Características acelerómetros	34
Tabla 3-3: Características caudalímetro	34
Tabla 4-1: Ensayo $y = 0.3$, $y = 0.4$. Frecuencia del motor, caudal y número de Froude	37
Tabla 4-2: Ensayos $y = 0.5$, $y = 0.6$. Frecuencia del motor, caudal y número de Froude	38
Tabla 5-1: Modos y frecuencias naturales	45
Tabla 5-2: Correlación entre modos. Tubería sin agua y con nivel medio	46
Tabla 5-3: Correlación entre modos. Tubería sin agua y semi-llena	46

Índice de figuras

Figura 2-1: Salto hidráulico en tubería circular [1].	3
Figura 2-2: Corriente de forma arbitraria sujeta a distintas Fuerzas [2].	5
Figura 2-3: Aplicación del principio del momentum al combinar flujos con fuerzas acordes con a) una demarcación razonable y b) una demarcación menos sensible del volumen de control. [2]	6
Figura 2-4: Distribución de presión y velocidad en flujo con superficie libre	8
Figura 2-5: Salto hidráulico en tuberías circulares	10
Figura 2-6: Gráfico de la profundidad secuencial [1]	12
Figura 2-7: Saltos hidráulicos. Vista lateral, $F=$ a) 1.1, b) 2.3, c) 4.1, d) 6.5 [2]	14
Figura 2-8: Saltos hidráulicos. Vista Superior, $F=$ a) 2.3, b) 4.1, c) 6.5 [2]	14
Figura 2-9: Espectro de una señal de vibración compleja [3].	15
Figura 2-10: Espectro de señal periódica [4]	17
Figura 2-11: Espectro de señal no periódica, fenómeno de leakage [4]	18
Figura 2-12: Ventanas temporales [4]	18
Figura 2-13: Principio de superposición para el mejoramiento del cálculo de la PSD [6]	20
Figura 2-14: Cálculo de la PSD al superponer PSD's de ocho segmentos de una señal [6]	21
Figura 2-15: Ley de potencia $-5/3$ en el sub-rango inercial para varios flujos turbulentos. El eje horizontal representa la frecuencia adimensional y el vertical el espectro de potencia (PSD) adimensional [6].	22
Figura 2-16: PSD resultante de 40 ensayos en tuberías de 7.62 cm de diámetro interno	24
Figura 2-17: Contenido en frecuencia de varios pulsos.[8]	25
Figura 2-18: Ventana <i>Force</i> . A la derecha se muestra la ventana, a la izquierda se muestra un impulso luego de la aplicación de la ventana <i>Force</i> [8].	26

Figura 2-19: Ventana exponencial y su aplicación en una respuesta que decae en el tiempo [8].	27
Figura 3-1: Instalación, modelo CAD.	28
Figura 3-2: Placa perforada entre la tubería de alimentación y la tubería objetivo.	29
Figura 3-3: Placa perforada al final de la tubería objetivo.	29
Figura 3-4: Placas perforadas. De izquierda a derecha, razones de llenado $f = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$. Medidas en milímetros.	31
Figura 3-5: Placas perforadas. Distintos patrones de perforaciones circulares para la obstrucción del flujo.	31
Figura 3-6: Instalación Experimental.	32
Figura 3-7: Elementos Estructurales	32
Figura 3-8: Tubería de alimentación.	33
Figura 3-9: Flanges.	33
Figura 3-10: Estanque y tubería de succión.	34
Figura 4-1: Esquema de la disposición de sensores y distancia entre soportes.	36
Figura 4-2: Niveles de agua para test de impacto. a) Vacío, b) Medio, c) Semi-completo (aprox. 75%).	38
Figura 4-3: Ensayo con variación de distancia entre soportes. Disposición de sensores.	39
Figura 5-1: Respuesta natural de la tubería vacía.	40
Figura 5-2: Respuesta de la tubería con nivel medio de agua.	41
Figura 5-3: Respuesta de la tubería con nivel semi-completo	41
Figura 5-4: Modos de vibrar. Tubería sin agua	43
Figura 5-5: Modos de vibrar. Tubería nivel medio	44
Figura 5-6: Modos de vibrar. Tubería semi-llena.	44
Figura 5-7: Correlación entre modos. Tubería sin agua y con nivel medio. Gráfica del MAC.	45
Figura 5-8: Correlación entre modos. Tubería sin agua y semi-llena. Gráfica del MAC.	46

Figura 5-9: Espectros bomba centrífuga. Los símbolos identifican las frecuencias de resonancia. Se tienen armónicos (de izquierda a derecha): 1.76X, 3.5X, 6X, 7X, 10.5X, 12.6X y 21.1X (no mostrado en las gráficas).....	48
Figura 5-10: Salto hidráulico $y=0.3$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 3.47, 4.73, 5.8, 7.1, 7.6.	50
Figura 5-11: PSD $y=0.3$, Número de Froude 3.47. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f - 5/3$ (rojo).....	51
Figura 5-12: PSD $y=0.3$, Número de Froude 4.73. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f - 5/3$ (rojo).....	51
Figura 5-13: PSD $y=0.3$, Número de Froude 5.8. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f - 5/3$ (rojo).....	52
Figura 5-14: PSD $y=0.3$, Número de Froude 7.1. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f - 5/3$ (rojo).....	52
Figura 5-15: PSD $y=0.3$, Número de Froude 7.66. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	53
Figura 5-16: Espectro $F=4.1$	54
Figura 5-17: Espectro $F=7.66$	54
Figura 5-18: Salto hidráulico $y=0.4$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 2.29, 2.74, 3, 3.71, 4.76, 5.14.	55
Figura 5-19: PSD $y=0.4$, Número de Froude 2.29. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	56
Figura 5-20: PSD $y=0.4$, Número de Froude 2.74. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	57
Figura 5-21: PSD $y=0.4$, Número de Froude 3. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	57
Figura 5-22: PSD $y=0.4$, Número de Froude 3.37. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	58
Figura 5-23: PSD $y=0.4$, Número de Froude 3.71. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	58
Figura 5-24: PSD $y=0.4$, Número de Froude 4.05. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	59

Figura 5-25: PSD $y=0.4$, Número de Froude 4.24. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	59
Figura 5-26: PSD $y=0.4$, Número de Froude 4.76. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	60
Figura 5-27: PSD $y=0.4$, Número de Froude 5.14. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	60
Figura 5-28: Espectro $F=5.14$	61
Figura 5-29: Salto hidráulico $y=0.5$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 1.92, 2.47, 2.93, 3.24, 3.79, 4.44.	62
Figura 5-30: PSD $y=0.5$, Número de Froude 1.92. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	63
Figura 5-31: PSD $y=0.5$, Número de Froude 2.47. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	64
Figura 5-32: PSD $y=0.5$, Número de Froude 2.93. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	64
Figura 5-33: PSD $y=0.5$, Número de Froude 3.24. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	65
Figura 5-34: PSD $y=0.5$, Número de Froude 3.79. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	65
Figura 5-35: PSD $y=0.5$, Número de Froude 4.44. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	66
Figura 5-36: Espectro, $F=3.24$. Peaks a 1.7x, 2.3x, 3.5x y 21x de la frecuencia de rotación del motor.	67
Figura 5-37: Espectro. $F=3.89$	67
Figura 5-38: Salto hidráulico $y=0.6$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 1.37, 1.62, 2, 2,38, 2.7, 3.37.	68
Figura 5-39: PSD $y=0.6$, Número de Froude 1.3. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	69
Figura 5-40: PSD $y=0.6$, Número de Froude 1.62. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	70
Figura 5-41: PSD $y=0.6$, Número de Froude 2. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	70

Figura 5-42: PSD $y=0.6$, Número de Froude 2.38. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	71
Figura 5-43: PSD $y=0.6$, Número de Froude 2.7. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	71
Figura 5-44: PSD $y=0.6$, Número de Froude 3.37. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f - 5/3$ (rojo).	72
Figura 5-45: Espectro, $F=3.3$	73
Figura 5-46: Aceleración RMS vs Número de Froude F , cc=condición de choking.....	74
Figura 5-47: Aceleración RMS vs Número de Froude F . Comparación ensayos con y sin salto hidráulico (sc).	75
Figura 5-48: Aceleración RMS vs Número de Froude F	76

1 Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Al transportar un fluido con dos fases (agua y aire) se corre el riesgo de presentar saltos hidráulicos (SH). Bajo determinadas circunstancias, los SH producen la formación de un flujo turbulento que puede causar vibraciones y desencadenar el fenómeno denominado “*choking*”, donde la tubería experimenta vibraciones violentas. Este tipo de fenómeno es de gran relevancia en aplicaciones industriales tales como transporte de pulpa en minería, túneles de vertedero, ingeniería de drenaje y alcantarillado.

La turbulencia del fluido genera sobre la superficie de los tubos fluctuaciones de presión aleatorias, que fuerzan la respuesta dinámica de los mismos como una vibración en frecuencias cercanas a sus frecuencias naturales. Las amplitudes de vibración que se tienen varían aleatoriamente en el tiempo y en dirección, por lo que su predicción con cierto grado de exactitud resulta muy compleja.

El presente trabajo de título intenta contribuir al estudio de los saltos hidráulicos en tuberías circulares desde el punto de vista del análisis de vibraciones teniendo como principales motivaciones el hecho de que, a la fecha, no se han efectuado estudios similares y que su realización requiere del diseño y construcción de una instalación que garantice la ocurrencia del fenómeno.

1.2 Objetivos

Este trabajo de título consiste en caracterizar de manera experimental las vibraciones inducidas por diferentes tipos de SH en una tubería. Para ello el autor ha construido una instalación en el laboratorio de sólidos de la facultad.. A continuación se enlistan los objetivos generales y específicos de este estudio.

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar experimentalmente las vibraciones producidas por saltos hidráulicos en una instalación diseñada y construida para garantizar la ocurrencia del fenómeno.

1.2.2 Objetivos específicos

La caracterización experimental contempla:

- Diseño y construcción de un sistema capaz de generar de manera controlada un salto hidráulico en una tubería circular.
- Realizar mediciones de la aceleración de las paredes de la tubería para un rango de números de Froude, en donde se espera que se desarrollen distintos SH, con el propósito de conocer la dependencia del valor cuadrático medio de la aceleración con respecto al número de Froude.
- Calcular la respuesta en frecuencia de las mediciones y analizar el espectro a través de la densidad de potencia espectral (PSD).
- Comparar el PSD de las mediciones con el de la tubería con agua (no circulando) para identificar las frecuencias y amplitudes características del fenómeno.
- Estudiar la influencia de variar la distancia entre los soportes en la aceleración de las paredes realizando mediciones con la tubería fijada en puntos discretos.

2 Antecedentes

En este capítulo se detallan tópicos importantes para el desarrollo del trabajo de título. Primero, se presenta un resumen sobre la descripción hidrodinámica de los saltos hidráulicos. Luego, en la Sección 2.1 se presentan aspectos generales sobre análisis espectral de señales y medición experimental de vibraciones. Finalmente, en la Sección 2.3 se tratan las características generales de vibraciones inducidas por turbulencia en tuberías.

2.1 Saltos hidráulicos en tuberías circulares

El salto hidráulico es un fenómeno de importancia en aplicaciones donde son utilizados conductos con flujos de superficie libre, tales como el transporte de pulpa en minería, obras de ingeniería de drenaje y alcantarillado. Usualmente se transporta una fase líquida con una co-corriente de aire.

El salto hidráulico se presenta como una irregularidad en la forma con que el fluido ocupa el interior del conducto. Como se puede ver en la Figura 2-1, el salto hidráulico se caracteriza por un cambio en el nivel del líquido. Por la denominación del fenómeno se entiende la transición del flujo desde el estado supercrítico al subcrítico, acompañado por una considerable producción de turbulencia local la cual está asociada a la disipación de energía.

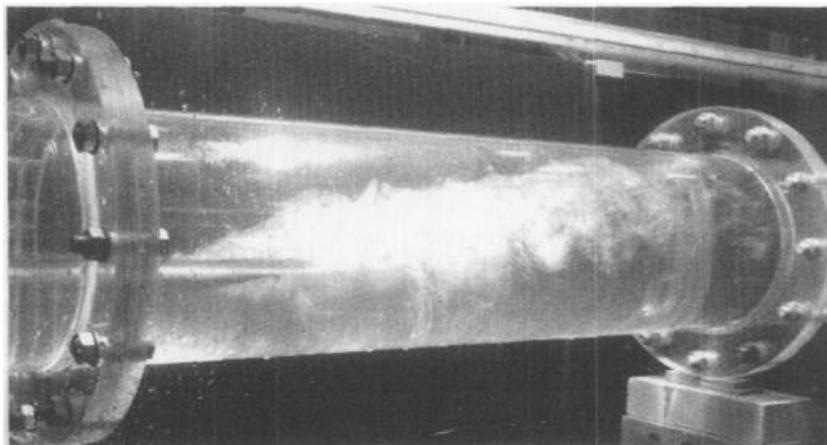


Figura 2-1: Salto hidráulico en tubería circular [1].

Las implicancias de este fenómeno son variadas. Al desarrollarse determinados patrones de salto hidráulico el fluido comenzará a inducir vibraciones en la tubería. Si se llega a la condición de “*choking*”, en la cual el fluido pasa a ocupar todo el conducto, pueden ocurrir vibraciones violentas producto de la formación de un régimen turbulento de líquido mezclado con aire aguas abajo desde la formación

del salto. Estas vibraciones son producidas debido a grandes fluctuaciones de presión en las paredes, lo que aumenta la probabilidad de falla por fatiga [1].

En las secciones a continuación se presentan tópicos de hidráulica esenciales para entender la formulación de la descripción de los saltos hidráulicos, luego se desarrolla el tema con el objetivo de presentar las condiciones relevantes para el acontecimiento del fenómeno conocido como “*choking*”.

2.1.1 Ecuaciones básicas

En hidráulica se utilizan tres principios básicos para la descripción de fenómenos: continuidad, que asegura la conservación de masa, el principio de fuerza específica, el cual se basa en el principio de conservación del momentum y hace alusión al equilibrio de fuerzas, y el principio de la energía. A continuación se presenta brevemente la ecuación del momentum en flujos y el principio de la energía [2].

2.1.1.1 Momentum

Se entiende por momentum el vector I obtenido del producto de la masa m por la velocidad V . Por otra parte, acorde a la ley de Newton, la suma de todas las fuerzas externas actuando sobre un cuerpo debe ser igual a la tasa de cambio del momentum del elemento. Para flujos con pérdidas significativas de energía, el principio del momento provee la ventaja de encontrar expresiones formales para lo que está sucediendo con el flujo.

En la Figura 2-2, se muestra líneas de corriente arbitrarias con una cierta forma de sección transversal de entrada 1 y de salida 2. Sobre la corriente actúan distintas fuerzas K que inciden en el principio del momento. Hay en primer lugar, fuerzas de presión K_D que siempre se aplican cuando el fluido entra o deja un volumen de control. Por otro lado, hay fuerzas tangenciales K_T como resultado de fricción viscosa. Estas perturban el patrón de flujo tanto matemática como físicamente. Este último hecho también opera en modelos hidráulicos [2]. Fuerzas externas como el peso del fluido también son consideradas, otras fuerzas como las disipativas internas, capilaridad y la Fuerza de Coriolis producto de la rotación de la tierra no son consideradas.

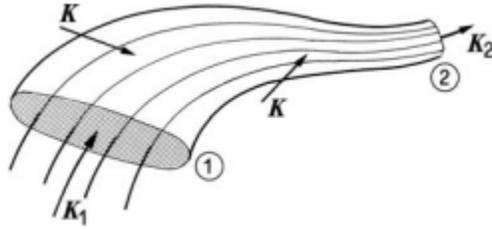


Figura 2-2: Corriente de forma arbitraria sujeta a distintas Fuerzas [2].

La variación del momentum $I = mV$ en el tiempo está dada por:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(mV) = V \frac{dm}{dt} + m \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Si la masa se expresa como el producto de la densidad y el volumen, la variación temporal de la masa de un fluido de densidad constante ρ esta dada por la expresión $dm/dt = \rho Q$. Remplazando esto en la Ecuación 1 se tiene que:

$$\frac{dI}{dt} = V(\rho Q) + m \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Para fluidos con flujo másico ρQ un cambio en el momentum puede también ocurrir en situaciones de flujo estacionario. En este caso, la tasa temporal de cambio de la velocidad es igual a 0. De la ley de Newton se tiene que, para flujo estacionario:

$$\rho QV = \sum K_a \quad (3)$$

Donde K_a denota a las fuerzas externas actuando sobre el flujo. La Ecuación 3 tiene, en general, tres componentes, de los cuales uno es relevante para consideraciones hidráulicas en una dimensión y cuya dirección puede escogerse arbitrariamente y que es la dirección del flujo. En la Figura 2-3 se observan dos aplicaciones de este principio. En la Figura 2-3 a) los límites del volumen de control siguen la forma de la estructura, y son perpendiculares a las líneas de corriente. Las caras de la descarga están bastante alejadas del centro del volumen de control, por lo que las líneas de corriente pueden considerarse paralelas. La dirección a considerar es la dirección principal del flujo así que las fuerzas de presión en las paredes pueden ser despreciadas. Debe notarse sí que las fuerzas tangenciales poseen una componente en la dirección del flujo.

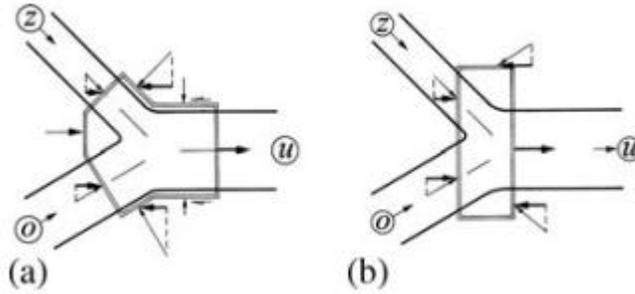


Figura 2-3: Aplicación del principio del momentum al combinar flujos con fuerzas acordes con a) una demarcación razonable y b) una demarcación menos sensible del volumen de control. [2]

Para aplicar el principio del momentum, la suma de todas las fuerzas externas debe ser igual a la tasa de cambio del momentum. En el caso de estado estacionario se tiene que:

$$\rho Q_o V_o + \rho Q_z V_z - \rho Q_u V_u = \sum K_a \quad (4)$$

El lado derecho de la Ecuación 4 consiste esencialmente en fuerzas de presión que actúan, por una parte, en las caras de descarga, y por otra, en las superficies curvas del volumen de control. Las fuerzas en las secciones transversales de entrada y salida siempre se obtienen como el producto de la presión en la sección p_s actuando en el centroide y el vector de sección transversal A , resultando en una fuerza estática $P_s = p_s A$. Se designa como fuerza específica al flujo de fuerza S el cual está representado por la suma del momento dinámico y el estático, dividido por el peso específico, así:

$$S = \frac{p_s}{\rho g} A + \frac{QV}{g} \quad (5)$$

La dimensión de la fuerza específica normalizada es la unidad de volumen. Esta representación, en la práctica, es ventajosa para la hidráulica, porque ni la densidad ρ ni la constante gravitacional g tienen algún cambio en fluidos homogéneos.

La Ecuación 5 permite hacer una representación modificada del principio del momentum: Si la presión estática se añade a la correspondiente fuerza dinámica al lado izquierdo de la Ecuación 4, la ecuación resultante dividida por ρg da como resultado:

$$\sum S = \sum K_B \quad (6)$$

La relación de la Ecuación 6 dice que la suma de todas las fuerzas específicas es igual a la suma de todas las fuerzas externas actuando en la delimitación del volumen de control (subíndice B).

2.1.1.2 Principio de la Energía

El principio de la conservación de la energía dice que el cambio en la energía de un sistema físico es igual a la adición de calor menos el trabajo realizado por el sistema. Se define la energía hidráulica E como:

$$E = \rho g Q \left[z + \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right] \quad (7)$$

Donde z es la altura sobre una referencia, p es la presión y V es la rapidez. Para un flujo estacionario, el cambio temporal en la fuente de calor menos los trabajos disipativos realizados entre dos secciones 1 y 2 es igual a la diferencia de energía hidráulica entre las dos secciones $E_1 - E_2$. La disminución en la energía mecánica del flujo en la dirección del movimiento es energía que se pierde y que fundamentalmente depende de la viscosidad del fluido.

Usualmente la descarga Q se mantiene constante entre dos secciones así como la densidad, en el caso del agua. Al dividir la Ecuación 7 por las constantes $\rho g Q$ es posible introducir el concepto de carga H :

$$H = \frac{E}{\rho g Q} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

En la Ecuación 8 es posible distinguir la elevación vertical desde una referencia fija z , la carga de presión $p/(\rho g)$ y la carga de velocidad $V^2/(\rho g)$. Si h_p denota la carga de presión en el centroide del área del perfil de presión en alguna sección transversal arbitraria, para una distribución de velocidad constante se tiene que:

$$h_p = H - \frac{V^2}{2g} = z + \frac{p}{\rho g} \quad (9)$$

Si la relación se resuelve para una carga de presión normalizada con la presión atmosférica $p(z = h_p) = 0$ la distribución de presión hidrostática sobre la sección transversal es:

$$\frac{p}{\rho g} = h_p - z \quad (10)$$

En la Figura 2-4 se muestra la distribución de presión y velocidad para un canal con superficie libre. En este tipo de aplicación, la carga H se expresa como:

$$H = z + h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (11)$$

Donde el término z representa la elevación del lecho del flujo, medida desde alguna referencia, y $h + \frac{Q^2}{2gA^2}$ representa la carga H^* relativa al ducto. Para la Ecuación 11, como la altura de la superficie es algo que se desconoce, tanto z como h dependen de la distancia horizontal x .

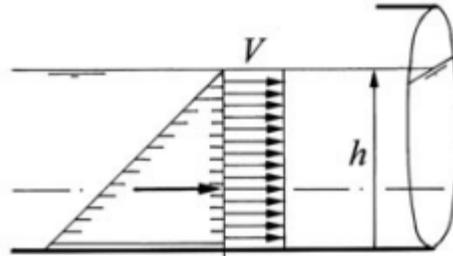


Figura 2-4: Distribución de presión y velocidad en flujo con superficie libre

2.1.2 Flujo crítico

El flujo crítico, al igual que el flujo uniforme, representa un estado especial referente a como se describe un flujo para un cierto canal. Mientras que el flujo uniforme conlleva un criterio estático en donde las fuerzas friccionales están balanceadas con las fuerzas impulsoras, el flujo crítico puede ser considerado como un criterio dinámico. El flujo crítico prevalece si la velocidad del flujo corresponde exactamente a la celeridad de una onda de gravedad elemental. Además, así como el flujo uniforme, el flujo crítico también depende de la geometría de la sección transversal del canal que conduce el fluido.

A continuación se presenta la descripción del flujo crítico a través de la ecuación de la energía en canales y se introduce el número de Froude según la referencia [2].

2.1.2.1 Descripción del flujo crítico

La carga H^* relativa al ducto está dada por la expresión:

$$H = z + h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (12)$$

Donde h es la profundidad del flujo, A es el área de la sección que atraviesa el flujo, g es la aceleración de gravedad y Q es la descarga. El área que atraviesa el flujo A para un canal abierto depende de la profundidad del flujo h y de la coordenada longitudinal x . La dependencia con x ocurre en canales no prismáticos en donde la sección transversal varía con cada posición x . Sin embargo, si la forma de la sección transversal no cambia, el canal es considerado prismático para el cual $A = A(h)$. En contraste, para flujos presurizados en un conducto cerrado, la sección transversal puede variar solo con x . Por otro lado, cabe mencionar que flujos con superficie libre

pueden ocurrir tanto en canales cerrados como abiertos y que en canales cerrados pueden ocurrir también flujos presurizados.

Consideremos un flujo de descarga constante, por lo que la carga H^* para una posición $x = x_*$ está representada por una función que depende solamente de la profundidad del flujo, h . El área de la sección transversal para esta posición es $A(x = x_*) = A_*$. Todos los canales tienen la particularidad que el área de la sección transversal que atraviesa el flujo aumenta con la profundidad, así $dA_*/dh > 0$. Si se deriva la expresión de la Ecuación 12 por la profundidad h dos veces se tiene que:

$$\frac{dH_*}{dh} = 1 - \frac{Q^2}{gA_*^3} \frac{dA_*}{dh} \quad (13)$$

$$\frac{d^2H_*}{dh^2} = \frac{3Q^2}{gA_*^4} \left(\frac{dA_*}{dh}\right)^2 - \frac{Q^2}{2gA_*^3} \frac{d^2A_*}{dh^2} \quad (14)$$

La función $H_*(h)$ posee un valor extremo para $dH_*/dh = 0$. El extremo corresponde a un máximo si $d^2H_*/dh^2 < 0$ o a un mínimo si $d^2H_*/dh^2 > 0$. La función adimensional $1 - (dH_*/dh)$ es denotada como la raíz del número de Froude. Por lo tanto:

$$\mathbf{F}^2 = \frac{Q^2}{gA_*^3} \frac{dA_*}{dh} \quad (15)$$

El número de Froude se puede interpretar como la razón entre las fuerzas inerciales y las gravitacionales en un flujo. Por otro lado, también puede ser interpretado físicamente como la razón entre la velocidad promedio del flujo y la velocidad de una onda de gravedad elemental (o perturbación) viajando sobre la superficie del flujo.

Así, un valor extremo para la carga H_* se obtiene para un número de Froude $\mathbf{F} = 1$. De la Ecuación 13 no se puede obtener información al imponer $\mathbf{F} = 1$. Sin embargo, si el segundo término del lado derecho de la Ecuación 13 es reemplazado por el término de la derecha de la Ecuación 15 y el resultado es derivado con respecto a h , se tiene que:

$$\frac{d^2H_*}{dh^2} = -2\mathbf{F} \frac{d\mathbf{F}}{dh} \quad (16)$$

Para una descarga constante, el número de Froude siempre decrecerá al incrementar la profundidad del flujo, i.e. $d\mathbf{F}/dh < 0$. Sin embargo, el valor extremo para la carga $H_*(\mathbf{F} = 1)$ es un valor mínimo. En consecuencia, la primera definición para flujo crítico es: Un flujo con superficie libre se dice crítico si la carga, medida desde la base del ducto, es mínima.

La ecuación 12 puede ser resuelta para la descarga Q , así:

$$Q = \mathbf{F}[2g(H_* - h)]^{1/2} \quad (17)$$

Si se asume una carga H_* constante, un valor máximo para la descarga puede ser obtenido para una profundidad de flujo de $h = h_c$ para $\mathbf{F} = 1$. La ecuación 17 entrega entonces una relación entre la descarga y la profundidad de flujo. La segunda definición de la condición crítica (sub-índice c) es: Flujo con superficie libre sujeto a una cierta carga H_* que lleva la máxima descarga Q_c para flujo crítico. Puede ser demostrado que para la condición crítica:

- La velocidad del flujo es igual a la celeridad $(gh)^{1/2}$ de una onda de gravedad desplazándose por la superficie del flujo, y que
- La fuerza específica S , de acuerdo con la Ecuación 5, tiene un valor mínimo.

Se puede aceptar rápidamente que la condición de flujo crítico decisivamente afecta a cualquier flujo circulando por un canal. Dado que el número de Froude de un conducto con flujo presurizado es prácticamente cero, este puede ser considerado como una característica importante de todos los flujos con superficie libre [2].

2.1.3 Razón de profundidad secuencial

En la Figura 2-5 se muestran los elementos principales para la descripción de los saltos hidráulicos en tuberías circulares, los cuales son: profundidad aguas arriba y aguas abajo del salto, h_1 y h_2 respectivamente, diámetro de la tubería D y largo característicos de aireación L_a y de recirculación L_R .

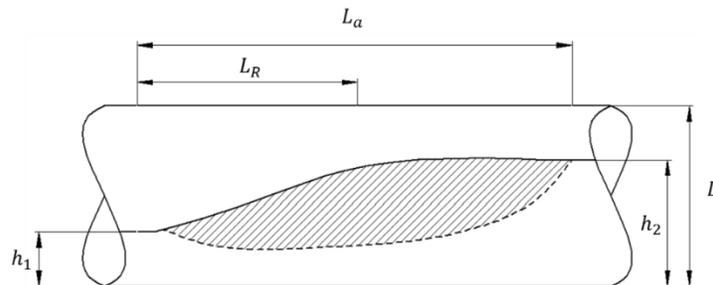


Figura 2-5: Salto hidráulico en tuberías circulares

La *razón de profundidad secuencial* Y es el parámetro utilizado para describir los saltos hidráulicos en conductos de sección transversal arbitraria y está dada por el cociente entre las profundidades del flujo aguas abajo y aguas arriba del salto (zona achurada en la Figura 2-5).

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad (18)$$

Debido a que cuando acontece el salto hidráulico existe una cantidad significativa de disipación de energía, se utiliza el principio del momento para establecer una relación entre Y , las propiedades físicas del fluido y la geometría de la tubería (i.e. densidad del fluido, diámetro de la tubería, etc). Como se vio en la sección 2.1.1.1, el principio de la fuerza específica dice que $S_1 - S_2 = 0$, donde los índices 1 y 2 indican posiciones aguas arriba y aguas abajo de la ocurrencia del salto (ver Figura 2-5). Para flujo en una dimensión, según la sección mencionada, la fuerza específica en un canal prismático está dada por:

$$S = z_s A + \frac{Q^2}{gA} \quad (19)$$

Donde tanto z_s , que es la distancia que existe entre el centroide de la sección transversal y la superficie del flujo, y A , que corresponde al área de la sección transversal, son funciones de la forma de la sección transversal y de la profundidad. Así, el principio de la fuerza específica asumiendo una descarga constante lleva a:

$$z_{s1} A_1 + \frac{Q^2}{gA_1} = z_{s2} A_2 + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (20)$$

Dado que se estudia el salto hidráulico en secciones transversales circulares parcialmente llenas, es necesario considerar las siguientes aproximaciones para el área transversal A y la fuerza de presión hidrostática P (ambas en función de la razón de llenado $y = h/D$, que toma valores entre 0 y 1)

$$\frac{A}{D^2} = y^{1.5} \quad (21)$$

$$\frac{P}{\rho g D^3} = \frac{1}{2} y^{2.5} \quad (22)$$

En las Ecuaciones 21 y 22, D es el diámetro de la tubería, ρ es la densidad del fluido, y g es la aceleración de gravedad. Es posible demostrar que, considerando las expresiones de las ecuaciones 21 y 22, para un canal de sección circular, la ecuación 19 puede escribirse como [1]:

$$\frac{1}{2} y_1^{2.5} + \frac{Q^2}{g D^5 y_1^{1.5}} = \frac{1}{2} y_2^{2.5} + \frac{Q^2}{g D^5 y_2^{1.5}} \quad (23)$$

Donde Q es el caudal. Dividiendo la Ecuación 23 por el primer término y considerando el número de Froude, que está dado por la expresión:

$$F_1 = \frac{Q}{(gDh_1^4)^{0.5}} \quad (24)$$

Se tiene que:

$$1 + 2F_1^2 = Y^{2.5} + 2F_1^2Y^{-1.5} \quad (25)$$

Con la Ecuación 25 se obtiene una aproximación para Y en función del número de Froude con $F_1 > 2$. Esta aproximación tiene un error del $\pm 2\%$ y está dada por:

$$Y = 1.16F_1^{0.85} \quad (26)$$

En la gráfica de la Figura 2-6 se muestra una comparación de resultados experimentales (línea continua) con predicciones de la razón de profundidad secuencial utilizando la Ecuación 26 (línea segmentada).

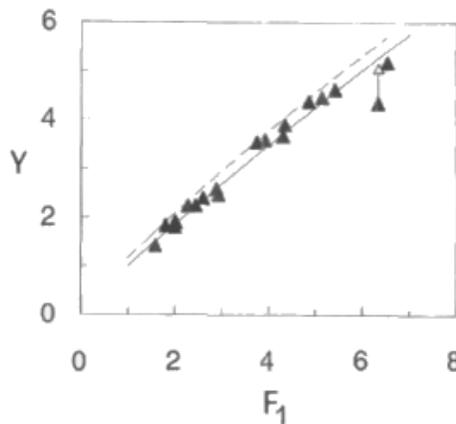


Figura 2-6: Gráfico de la profundidad secuencial [1]

Los resultados experimentales obtenidos por Stahl y Hager [1] para un rango de números de Froude de $1.5 < F_1 < 6.5$, y para un rango de la razón de llenado de $0.2 < y < 0.7$, arrojan la siguiente correlación para Y en función de F_1 :

$$Y = 1.00F_1^{0.90} \quad (27)$$

2.1.4 Condición de “choking”

El flujo experimenta “choking” (denotado por el subíndice c) cuando la profundidad h_2 es igual al diámetro de la tubería D .

Para encontrar el caudal al cual se tiene la condición de “choking” (Q_c) se considera $F_1 > 1.5$ y $h_2 = D$. De la Ecuación 11 se puede aproximar

$$Y_c \approx F_1 = \frac{D}{h_1} \quad (28)$$

Con lo que, reemplazando en la expresión del número de Froude, se tiene la siguiente expresión para el caudal de “choking”:

$$\frac{Q_c}{(gD^3h_1^2)^{0.5}} = 1 \quad (29)$$

Esta expresión puede ser utilizada en el diseño de instalaciones. Se recomienda considerar un caudal Q que cumpla con:

$$Q < \sigma Q_c \quad (30)$$

Donde σ es un factor de seguridad entre 0 y 1. Esta expresión permite evitar la condición de “choking”.

2.1.5 Tipos de salto hidráulico y apariencia [1]

El salto hidráulico en conductos posee diferentes apariencias, como se muestra en la Figura 2-7. Para números de Froude hasta 1.5, el salto es undular. Para números de Froude entre 1.5 y 2 las undulaciones se quiebran en el lado aguas arriba. Para números de Froude sobre 2 las undulaciones desaparecen y pueden acontecer dos tipos de salto hidráulico:

- Para razones de llenado pequeñas, $y_1 < 1/3$, el ancho a lo largo del salto se incrementa, y se forman alas laterales a los pies del salto. El flujo que avanza se concentra axialmente como un jet de superficie y dos separaciones asimétricas inducen zonas de recirculación lateral.
- Para razones de llenado mayores, el ancho de la superficie a lo largo del salto es casi constante, y el salto es similar al salto hidráulico clásico (conductos rectangulares), con una superficie rodante en vez de alas laterales.

En la Figura 2-7 se presentan las características típicas como función del número de Froude. En la figura las letras a-d se refieren, respectivamente, al salto hidráulico undular con $F_1 = 1.1$, salto hidráulico directo con $F_1 = 2.3$, salto hidráulico con flujo en recirculación $F = 4.1$, y salto hidráulico con una transición a flujo presurizado con $F_1 = 6.5$.

En la Figura 2-8 se presentan vistas superiores relacionadas con los saltos hidráulicos mostrados en la Figura 2-7. Para razones de llenados $y_1 > 1/3$, el salto hidráulico directo es similar al salto hidráulico clásico, con un frente recto, una superficie rodante y una zona de flujo inferior avanzando (Fig. 2-8 a). Sin embargo,

para $y_1 < 1/3$ el ancho de la superficie a lo largo del salto incrementa y el flujo que avanza se concentra en una porción de la superficie libre. Al lado opuesto, el flujo recircula y tiene un frente típico con forma de cuña (Fig. 2-8 b). Para números de Froude altos (Fig. 2-8 c), la tubería se presuriza, con regiones definidas de flujo avanzando y retrocediendo. Tales flujos deben ser evitados debido a las grandes fluctuaciones de presión y al rompimiento de la condición de superficie libre.

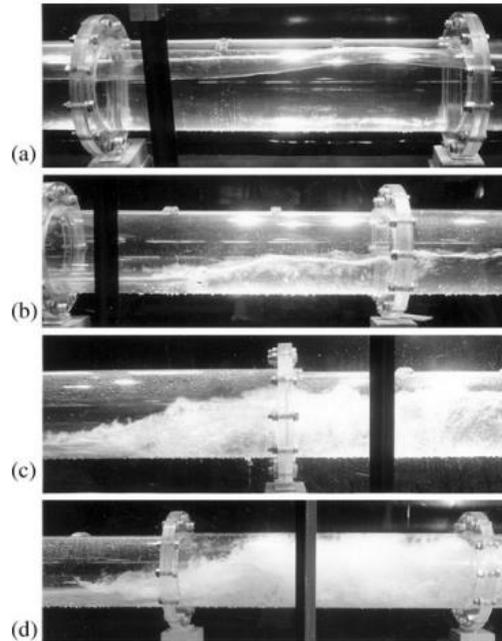


Figura 2-7: Saltos hidráulicos. Vista lateral, F= a) 1.1, b) 2.3, c) 4.1, d) 6.5 [2]

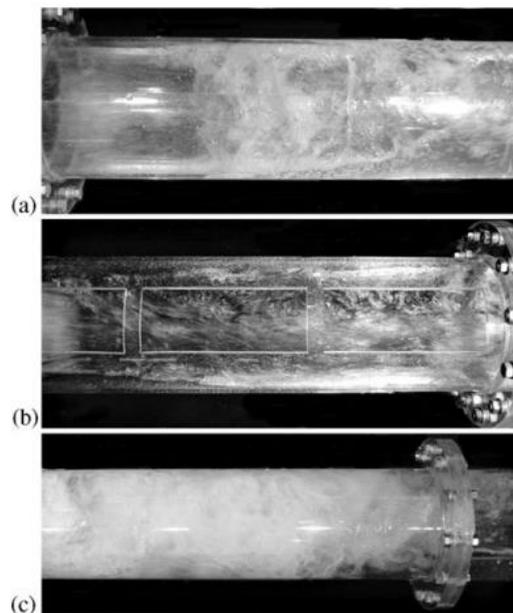


Figura 2-8: Saltos hidráulicos. Vista Superior, F=a) 2.3, b) 4.1, c) 6.5 [2]

2.2 Vibraciones mecánicas

En esta sección se revisan brevemente algunos tópicos importantes sobre vibraciones mecánicas necesarios para el desarrollo del trabajo de título. Se revisa el análisis espectral (tratamiento de señales temporales en el dominio de frecuencia), la medición experimental de vibraciones y se presentan diversos resultados sobre vibraciones por turbulencia en tuberías presurizadas. En este apartado se asume que el lector está familiarizado con aspectos básicos de vibraciones mecánicas. De no ser así, se recomienda al lector ir a la referencia [3].

2.2.1 Análisis espectral

Luego de capturar datos sobre las vibraciones mecánicas de una estructura o máquina se debe realizar una descomposición de éstos ya que contienen mucha información, la cual se hace difícil de analizar en la forma de una señal temporal. La herramienta utilizada para este propósito es la Transformada de Fourier, método que permite descomponer una señal compleja en el dominio del tiempo en una serie de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos.

En la Figura 2-9 se observa una señal de vibración compleja en el dominio del tiempo a la cual se le descompone en señales sinusoidales, las que a su vez pueden ser representadas en el dominio de la frecuencia [3].

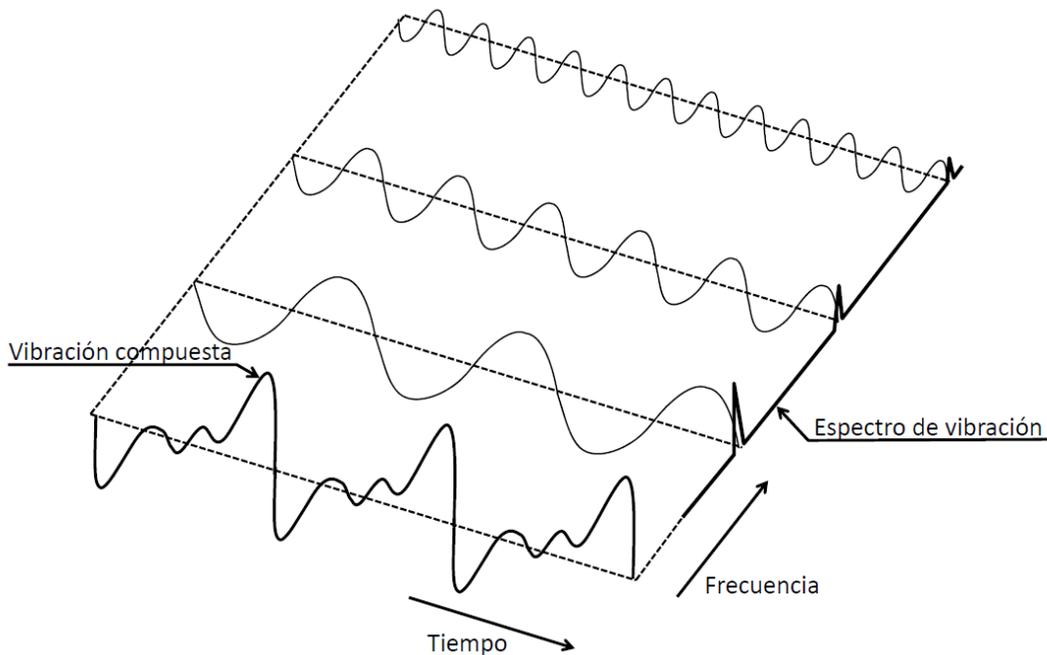


Figura 2-9: Espectro de una señal de vibración compleja [3].

2.2.1.1 Transformada de Fourier

Para cualquier señal periódica $g(t)$ de periodo T tal que:

$$g(t) = g(t + T) \quad (31)$$

Se puede mostrar que:

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cos(k\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{+\infty} b_k \sin(k\omega_0 t) \quad (32)$$

donde ω_0 es la frecuencia natural angular fundamental en $\frac{rad}{s} = \frac{2\pi}{T}$.

Los coeficientes a_k y b_k se obtienen al correlacionarlos con la función $g(t)$ de la siguiente manera:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (33)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sin(k\omega_0 t) dt \quad (34)$$

Definiendo $\Delta f = \frac{1}{T}$ ($\omega_0 = 2\pi\Delta f$), se tiene que la transformada de Fourier de $g(t)$ está dada por:

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} G(k\Delta f) e^{j2\pi k\Delta f t} \quad (35)$$

donde los coeficientes de Fourier vienen dados por:

$$G(k\Delta f) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) e^{-j2\pi k\Delta f t} dt \quad (36)$$

con t : tiempo, k : entero que cuenta los pasos de la frecuencia, Δf : espaciado de frecuencias, T : periodo del tiempo.

Cuando se usan computadores digitales, se hace necesario adquirir la señal continua en intervalos de tiempo. Esto significa que la señal continua queda representada por una señal discreta con valores a tiempos equidistantes. Por otra parte, en condiciones reales de medición experimental es imposible medir la señal temporal hasta un tiempo infinito. Una parte de la señal debe ser seleccionada. Se

asume que la señal capturada se repite con un periodo T , entregando una función periódica. Combinando la hipótesis de periodicidad con un muestreo temporal de la señal, se obtiene la definición de la transformada discreta de Fourier [3]:

$$g(n\Delta t) = \frac{1}{f_s} \sum_{k=0}^{N_s-1} G(k\Delta f) e^{j2\pi k/N_s} \quad (37)$$

$$G(n\Delta t) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} g(n\Delta t) e^{-j2\pi k/N_s} \quad (38)$$

con N_s : número de datos, $T = N_s\Delta t$ y $f = N_s\Delta f$.

Calcular la transformada discreta de Fourier directamente requiere de N_s^2 operaciones. Hoy se utiliza un algoritmo denominado transformada rápida de Fourier que es capaz de reducir el número de operaciones necesarias a $N_s \log_2 N_s$.

2.2.1.2 Errores y Ventanas

Uno de los errores principales durante el proceso de análisis digital de una señal es el *leakage*. El *leakage* se origina debido a que los datos deben ser adquiridos en un periodo de observación finito T . La transformada discreta de Fourier asume entonces que la señal es periódica con período T . Si esta condición no se cumple, se produce un error de *leakage*, lo que conlleva anomalías importantes de amplitud y frecuencia en el espectro [4]. Esto se ejemplifica en la Figura 2-10 y en la en donde se observa el espectro de una señal periódica y el espectro de otra con *leakage*.

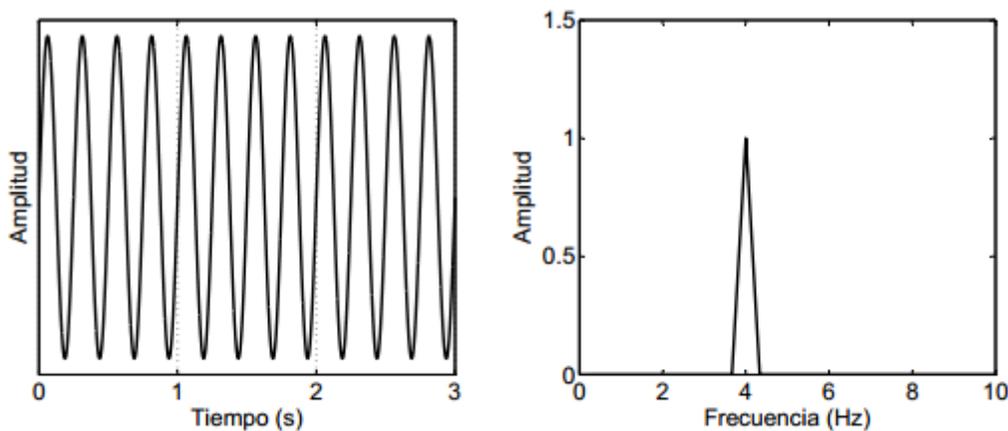


Figura 2-10: Espectro de señal periódica [4]

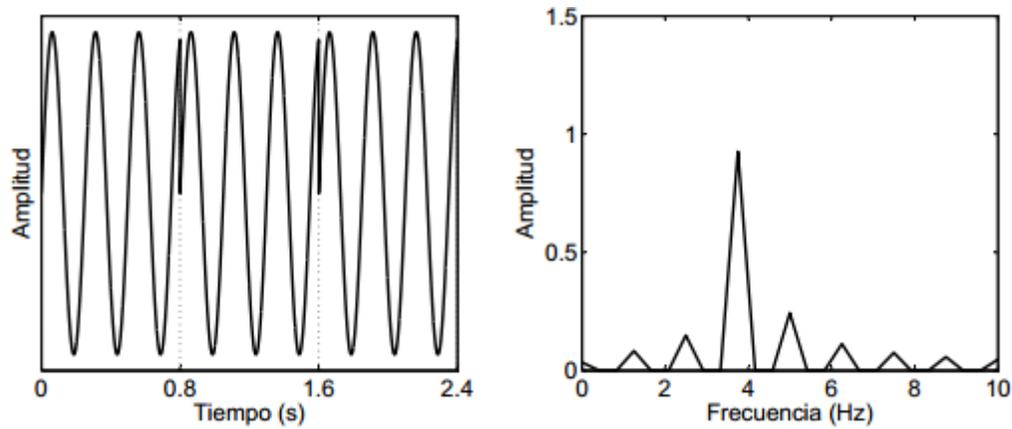


Figura 2-11: Espectro de señal no periódica, fenómeno de leakage [4]

Para atenuar los efectos de errores en el análisis digital se utilizan herramientas conocidas como ventanas. Las ventanas operan en la señal temporal y tienen el efecto de permitir considerar solo una parte de esta. Existen distintos tipos de ventanas, y se puede optimizar la selección de alguna para disminuir los efectos de algún tipo de error como es el caso del leakage. En general, se buscan ventanas que reduzcan las discontinuidades en los extremos de la señal, dado que de esta manera fuerzan a la señal a ser periódica en el intervalo de medición. La selección de una ventana de tiempo en particular es siempre un compromiso entre una buena estimación de la amplitud y una buena resolución espectral. En la Figura 2-12 se muestra un conjunto de ventanas de tiempo que son usualmente empleadas [4].

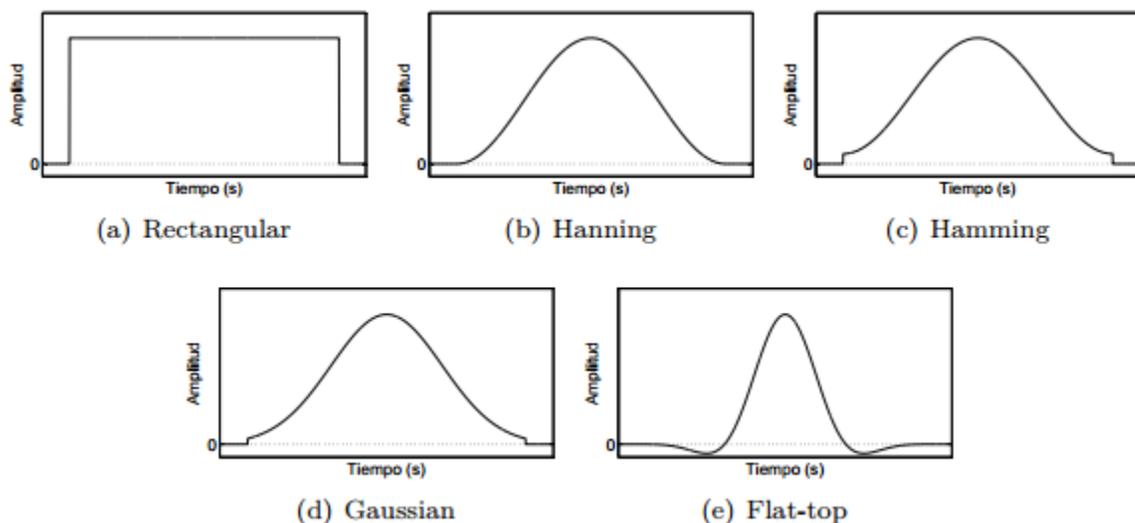


Figura 2-12: Ventanas temporales [4]

Al aplicar distintas ventanas a una señal no periódica llevará a que solo algunas puedan separar el contenido en frecuencia de la señal. Es por esto que hay que buscar la ventana más idónea según sea la aplicación. Por otro lado, la amplitud obtenida en el dominio de frecuencia dependerá del tipo de ventana utilizada, ya

que al utilizar ventanas no rectangulares, los extremos de la señal pierden energía. Lo que conlleva a una disminución en la amplitud mostrada en el dominio de la frecuencia. Este error puede ser compensado ya que solo depende de la forma de la ventana y no de la señal temporal muestreada.

2.2.1.3 Potencia Espectral

La potencia espectral da cuenta de las frecuencias que contienen la potencia de la señal, donde potencia se entiende como el valor promedio de la señal al cuadrado. En el dominio de frecuencia es el cuadrado de la magnitud de la FFT (*Fast Fourier Transform-Transformada rápida de Fourier*) de la señal [5].

La potencia espectral se calcula mediante periodogramas, los cuales pueden ser aplicados a la señal completa o a segmento de esta, que al ser promediados entre sí entregan la densidad de potencia espectral (PSD).

Un periodograma calcula la potencia espectral de toda la señal de entrada como:

$$Periodograma = \frac{|F|^2}{N} \quad (39)$$

Donde $|F|$ es el valor absoluto de la transformada de Fourier de la señal y N es un factor de normalización que usualmente es el número de muestras.

El resultado del periodograma es usualmente normalizado por un factor para hacer que el resultado satisfaga el teorema de Parseval:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |Amplitud\ FFT_i|^2 = \sum_{i=0}^{N-1} |Magnitud\ de\ los\ datos_i|^2 \quad (40)$$

Donde la FFT se calcula a partir de los datos adquiridos de la señal y N es el número de datos de la señal en el dominio del tiempo.

Existen diversas convenciones en la literatura para que la normalización del periodograma pueda satisfacer el teorema de Parseval, las cuales dependen de la potencia promedio, de la aplicación de alguna ventana, y de si el periodograma considera uno o ambos lados del dominio de frecuencia.

Al usar una función ventana, la cantidad de energía en la señal se reduce. Se debe multiplicar por un factor, que depende del tipo de ventana, para compensar este efecto [6].

2.2.1.4 Densidad de potencia espectral (PSD)

La densidad de potencia espectral es el gráfico en el espacio de frecuencia de la potencia versus la frecuencia.

Tomando el promedio de los periodogramas, calculados para segmentos de señales temporales de larga duración, se logra asignar de una manera más correcta la potencia a las frecuencias y también se promedian y/o reducen las fluctuaciones producidas por ruido en las amplitudes de la potencia. Por otra parte, existe un compromiso entre una mejor asignación de los valores de la potencia con la resolución en frecuencia, debido a que esta última se ve reducida debido a una menor cantidad de datos disponibles para cada cálculo de cada FFT.

Es posible mejorar la exactitud en el cálculo de la PSD mediante la aplicación de ventanas porque se disminuyen los efectos de *leakage* (que la señal no sea periódica en el intervalo considerado). Si bien se elimina la contribución de los extremos de la señal, esto puede evitarse al superponer segmentos como se muestra en la Figura 2-13. En la Figura 2-14, se muestra el resultado de superponer ocho segmentos en el cálculo de la PSD de una señal.

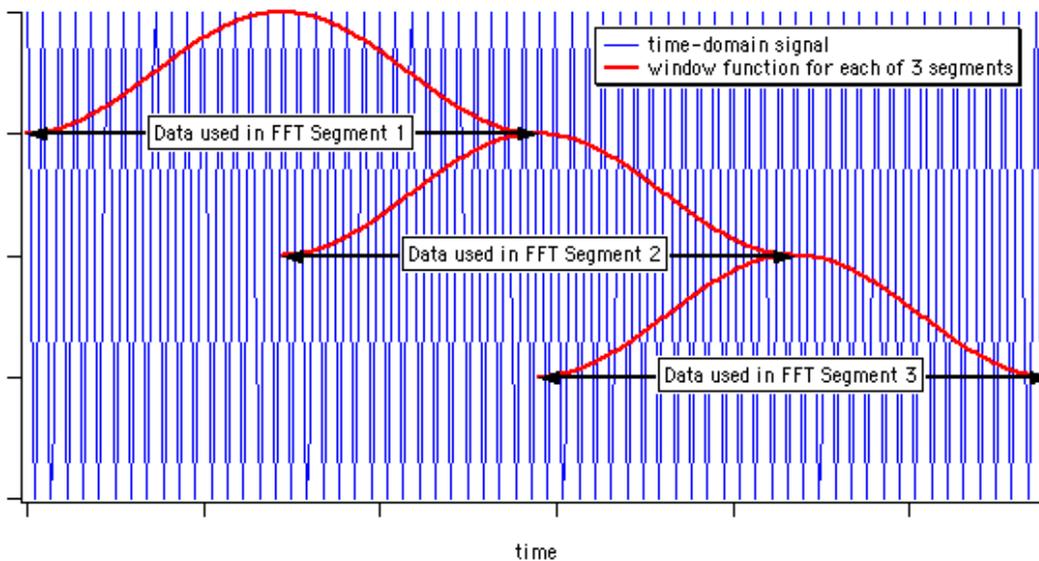


Figura 2-13: Principio de superposición para el mejoramiento del cálculo de la PSD [6]

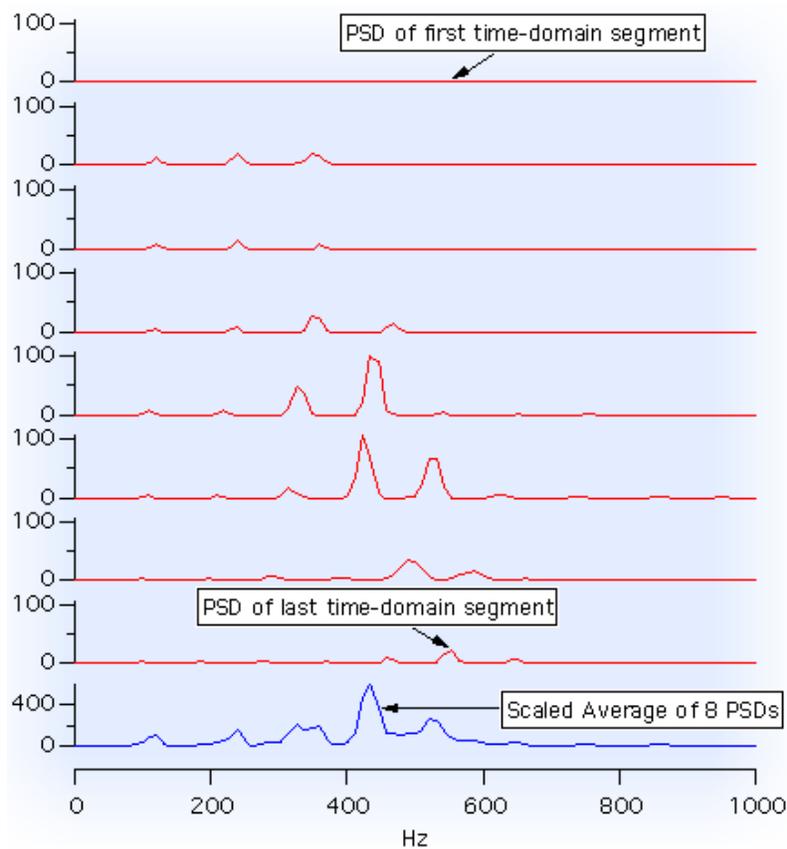


Figura 2-14: Cálculo de la PSD al superponer PSD's de ocho segmentos de una señal [6]

2.2.2 Vibraciones por turbulencia en tuberías: Flujo Interno

2.2.2.1 Características Generales

Para el caso de una tubería presurizada, el flujo turbulento completamente desarrollado en tuberías se compone de vórtices y remolinos de varios tamaños, en rangos que van desde el orden de magnitud del diámetro de la tubería interna a la escala de Kolmogorov¹. La energía cinética contenida en los remolinos incrementa con la velocidad del flujo, lo que resulta en mayores fluctuaciones de presión. Los remolinos de mayor tamaño son el resultado de cierto mecanismo responsable de la generación de turbulencia (i.e. roce en las paredes, chorros, etc). Debido a que estos remolinos tienen diversas cantidades de energía cinética, a medida que se acercan a las paredes de la tubería la energía se convierte. Cierta cantidad es transformada en calor, pero la mayoría se convierte en presión y fluctuaciones de presión, una forma de energía potencial.

¹ Escala hidrodinámica más pequeña en flujos turbulentos. Esta escala de longitud depende de la tasa de disipación $\epsilon [m^2/s^3]$ y de la viscosidad $\nu [m^2/s]$. El largo de la escala está dado por $\eta = (\nu^3/\epsilon)^{\frac{1}{4}}$. (<http://www.eng.utah.edu/~mcmurtry/Turbulence/turbflt.pdf>)

Se revelan estructuras comunes cuando se grafica el espectro de potencia (PSD) de diversos flujos turbulentos [7] (i.e. flujos turbulentos en distintas escalas de longitud y tiempo). En la Figura 2-15 se muestra la gráfica mencionada. En el eje de las ordenadas se muestra la potencia espectral adimensional, donde E_{11} es la función de energía espectral, k_1 es el número de onda que está relacionado con la frecuencia a través de la velocidad del flujo, ϵ es la tasa de disipación de energía y ν es la viscosidad cinemática, mientras que en el eje de las abscisas se tiene la frecuencia adimensional, donde η es la escala de Kolmogorov. La gráfica presenta una región de decaimiento conocida como sub-rango inercial. En esta región, la energía del flujo forma una cascada desde las escalas mayores (bajas frecuencias) a las menores (altas frecuencias). Si bien no ha podido deducirse de las ecuaciones de Navier-Stokes, por medio de resultados experimentales en diversos tipos de flujos turbulentos, se tiene que el PSD medido en el sub-rango inercial decae como $f^{-5/3}$.

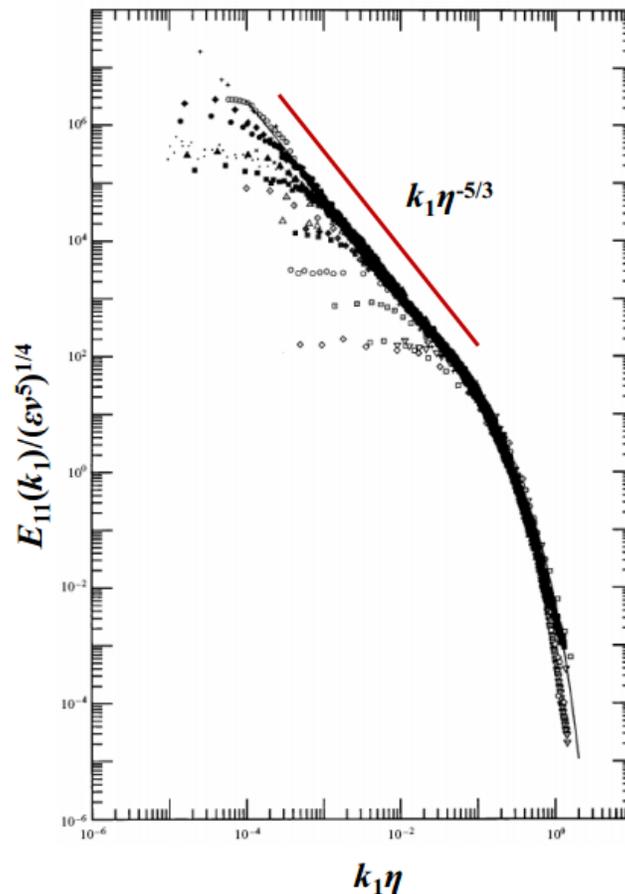


Figura 2-15: Ley de potencia -5/3 en el sub-rango inercial para varios flujos turbulentos. El eje horizontal representa la frecuencia adimensional y el vertical el espectro de potencia (PSD) adimensional [6].

2.2.2.2 Relaciones de Escala

Según Thompson [7], se ha demostrado que la desviación estándar de las vibraciones en una tubería son proporcionales a la desviación estándar de las fluctuaciones de presión ($A' \sim P'$). También se presentó que la energía cinética en el flujo era convertida en presión dinámica cerca de las paredes. Refiriéndose a la definición de energía cinética y presión dinámica respectivamente:

$$E_c = \frac{1}{2} m V_f^2 \quad y \quad P = \frac{1}{2} \rho V_f^2 \quad (41)$$

En las expresiones mostradas m es la masa, V_f es la velocidad del fluido, y ρ es la densidad. La presión dinámica tiene unidades de energía cinética por unidad de volumen y por otra parte, se deduce que, como las fluctuaciones de la presión dinámica del flujo son proporcionales a la energía cinética V_f^2 , las fluctuaciones de aceleración también son proporcionales, o sea ($A' \sim V_f^2$).

En su trabajo, Thompson muestra que en secciones sin soportes, las fluctuaciones de presión P' son proporcionales a las fluctuaciones en la aceleración A' , la que a su vez, es proporcional a $\sim V_f^2$. También, observó que A' incrementa al incrementar D/t .

2.2.2.3 Espectro de la Aceleración

En el trabajo de Thompson [7] se estudia el espectro de potencia para diversas adquisiciones de aceleración de las paredes de la tubería. Para el cálculo de las PSD, el autor divide sus adquisiciones en dos intervalos de tiempo. Luego, normaliza cada conjunto de datos por sus respectivas desviaciones estándar A' , las cuales son referidas por A_{norm} . Calculando la transformada rápida de Fourier (FFT) de cada A_{norm} y elevándola al cuadrado, estima la PSD de cada conjunto de datos, la cual presenta normalizada por el cuadrado de la tasa de adquisición. A esta PSD normalizada se refiere por \tilde{A} .

En la Figura 2-16 se muestran los resultados obtenidos en uno de los ensayos, a bajas velocidades, realizados por Thompson [7]. En la gráfica se comparan los resultados con la respuesta natural de la tubería y se destaca la ley de potencia $-5/3$ para la frecuencia característica del decaimiento en flujos turbulentos. A bajas velocidades, los “peaks” presentados en \tilde{A} también se observan en la respuesta natural de la tubería, revelando que en este régimen, la respuesta dinámica de la tubería en turbulencia es sensible a las frecuencias naturales de la tubería.

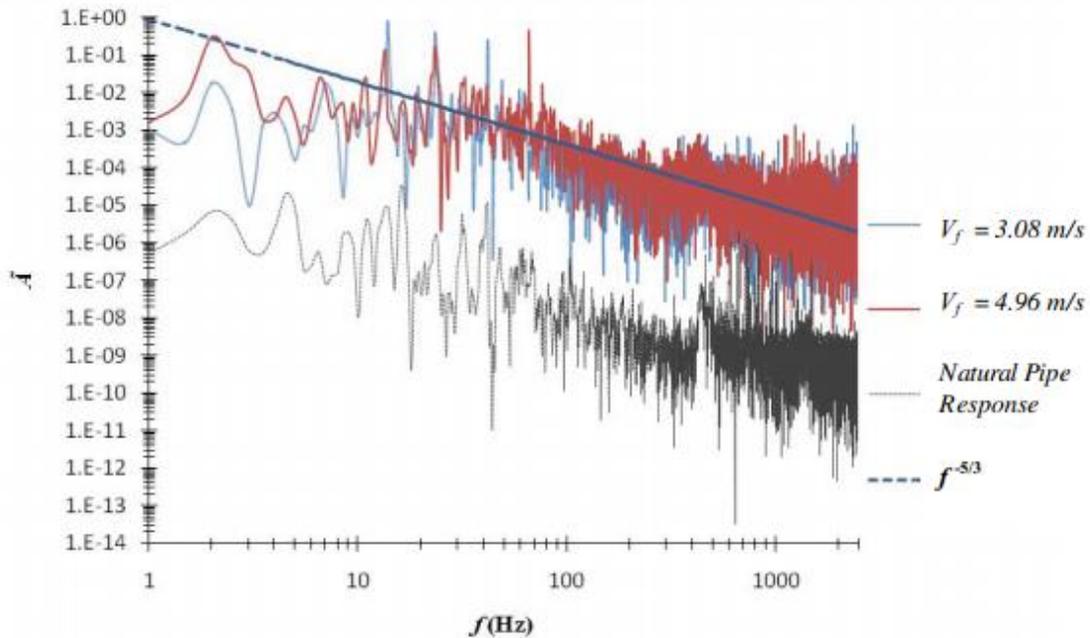


Figura 2-16: PSD resultante de 40 ensayos en tuberías de 7.62 cm de diámetro interno

2.2.3 Medición experimental

2.2.3.1 Transductores

Para el monitoreo de vibraciones mecánicas son utilizados diversos tipos de transductores. Estos elementos transforman la vibración mecánica en una señal eléctrica analógica, la que posteriormente se procesa y analiza. Los hay de velocidad y aceleración, entre los que destacan están los sensores de proximidad, sensores sísmicos de velocidad y acelerómetros piezoeléctricos.

Para la caracterización de las vibraciones producidas por saltos hidráulicos serán utilizados acelerómetros piezoeléctricos. 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. Así, cuando un acelerómetro vibra, una masa en su interior genera una fuerza sobre un cristal la cual es proporcional a la aceleración.

Generalmente, el rango de precisión en las señales adquiridas está entre 1 Hz y 15.000 Hz. Son particularmente útiles en captar vibraciones a alta frecuencia, donde aparecen esfuerzos con desplazamientos relativamente pequeños [3].

2.2.3.2 Test de Impacto

Para conocer los modos de vibrar de una estructura existen diversos mecanismos dentro de los que destaca el test de impacto. Esta técnica consiste en aplicar un impulso a través de un martillo, una pistola eléctrica o una masa suspendida y medir la respuesta dinámica del sistema. El martillo es la herramienta más utilizada para este tipo de análisis.

Dado que la fuerza es un impulso, el nivel de amplitud de la energía aplicada a la estructura es una función de la masa y la velocidad del martillo. Esto debido al concepto de momentum lineal, que se define como el producto de la masa y la velocidad. El impulso entonces es igual al cambio de momentum en la estructura. Controlar la velocidad del martillo es complicado, por lo que el nivel de la fuerza se controla a través de la masa.

El contenido en frecuencia de la energía aplicada a la estructura es una función de la rigidez de las superficies en contacto y, en menor medida, de la masa del martillo. La rigidez de las superficies en contacto afecta la forma del pulso de fuerza aplicado, lo que determina el contenido en frecuencia. Ya que no se puede cambiar la rigidez de la superficie del objeto al que se quiere realizar el análisis modal, el contenido en frecuencia se controla variando la rigidez de la punta del martillo. Mientras más rígida sea la punta, más corto será el impulso y así más alto el contenido en frecuencia. Esto se ejemplifica en la Figura 2-17. La regla es que el espectro de la fuerza no esté a más de entre 10 y 20dB por debajo de la máxima frecuencia de interés.

Al realizar un test de impacto se tienen dos problemas al momento de procesar las señales. El primero es el ruido, que puede estar presente tanto en la fuerza como en la señal de respuesta como resultado de un tiempo elevado de medición. Y segundo, que en la respuesta puede presentarse *leakage* como resultado de un tiempo muy corto de medición. Se pueden compensar ambos efectos a través de la aplicación de ventanas, como se vio en la sección 2.2.1.4.

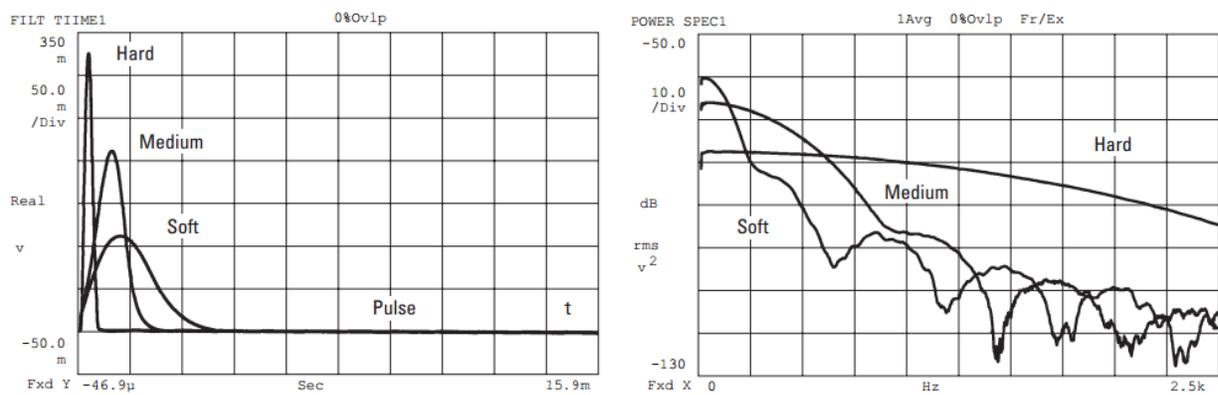


Figura 2-17: Contenido en frecuencia de varios pulsos.[8]

Dado que el pulso de la fuerza es relativamente corto respecto al tiempo de medición, la porción de la señal después del pulso es ruido y puede ser eliminada sin afectar al pulso en sí mismo. La ventana diseñada para lograr esto es llamada *Force*, y se muestra en la Figura 2-18. Por otro lado, la señal de respuesta es una función que decae exponencialmente y que puede decaer totalmente antes o después del término de la medición. Si la estructura está muy amortiguada, la respuesta puede decaer antes del final del tiempo de medición. En este caso, se puede aplicar una ventana para eliminar el ruido remanente en la medición. Por otra parte, si la estructura tiene un amortiguamiento muy bajo, la respuesta puede continuar hasta después del tiempo de medición. En este caso, se debe forzar artificialmente a la señal a decaer para minimizar el leakage. La ventana diseñada para conseguir ambos efectos es la exponencial, que se muestra en la Figura 2-19.

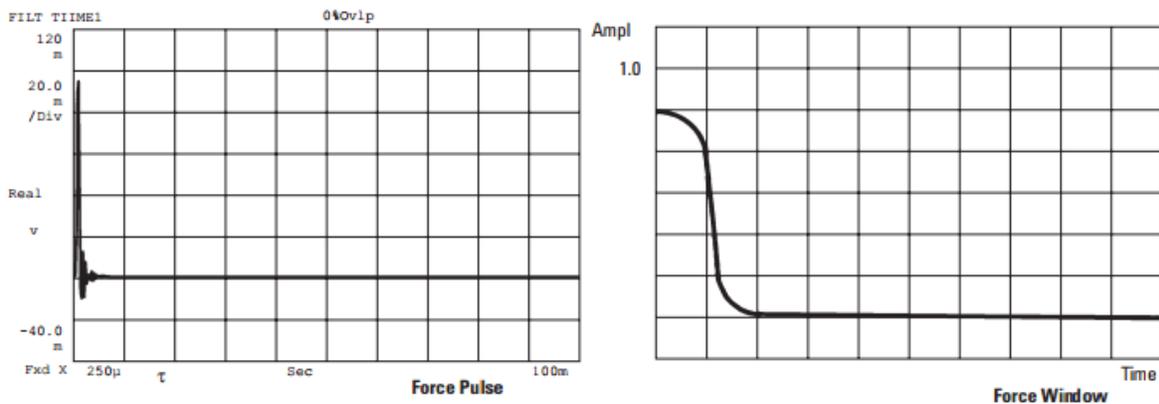


Figura 2-18: Ventana *Force*. A la derecha se muestra la ventana, a la izquierda se muestra un impulso luego de la aplicación de la ventana *Force* [8].

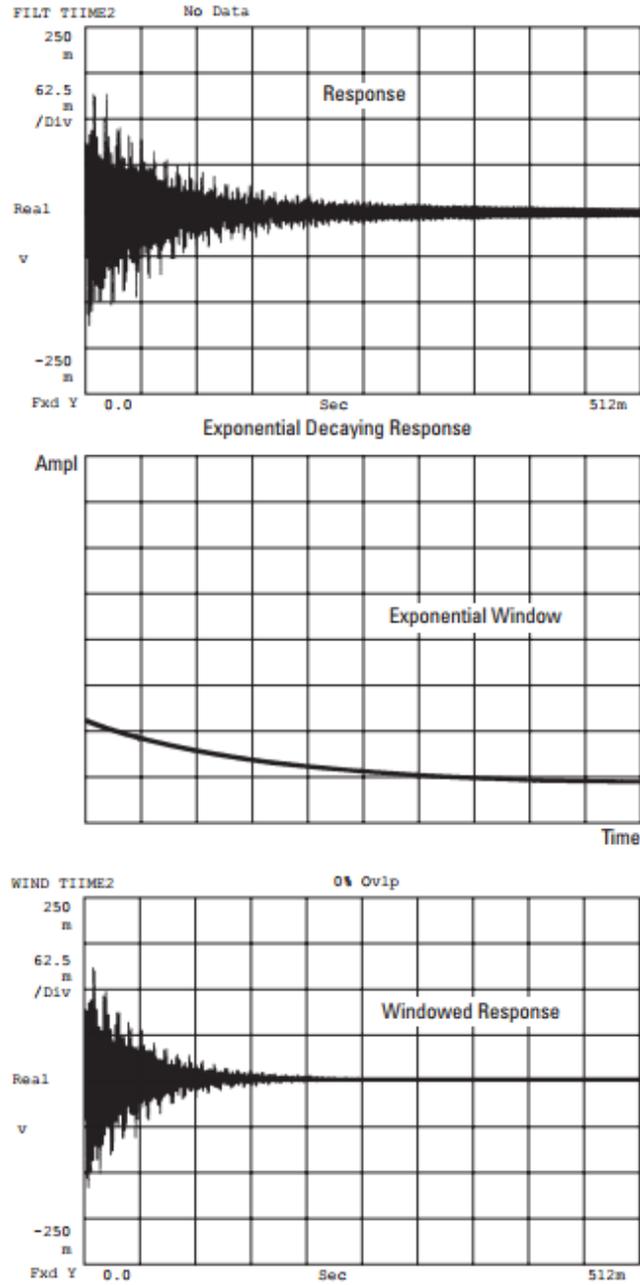


Figura 2-19: Ventana exponencial y su aplicación en una respuesta que decae en el tiempo [8].

3 Montaje Experimental

3.1 Instalación

Los experimentos serán llevados a cabo en un circuito cerrado de agua en donde se pretende forzar la ocurrencia de un salto hidráulico. En la Figura 3-1 se muestra un esquema de la instalación con sus principales componentes.

El agua es impulsada por la instalación vía una bomba centrífuga marca Diana de potencia 1hp y velocidad angular nominal 2800 rpm accionada por un motor. La bomba se encuentra fija a un soporte de acero con descansos de goma, el cual se encuentra a su vez anclado a un bloque de concreto para aislar las vibraciones del resto del laboratorio. Los elementos estructurales, que soportan el peso de la tubería objetivo, se encuentran también fijos al bloque de concreto. La velocidad de giro del motor se encuentra regulada por un variador de frecuencia marca ABB, modelo Parajust GX. La bomba centrífuga extrae agua de un estanque de 110L a través de un tubo de PVC de 32 mm provisto de una válvula de bola. El tramo vertical de alimentación está compuesto por una junta de expansión, un medidor de caudal y una reducción en donde el diámetro cambia de 32mm a 44,05mm. La conexión entre el tramo de alimentación y la tubería objetivo se hace a través de flanges de acrílico. Se dispone de placas perforadas entre los flanges que conectan el tramo de alimentación con la tubería objetivo para hacer que el flujo sea laminar después del codo como se muestra en la Figura 3-2.

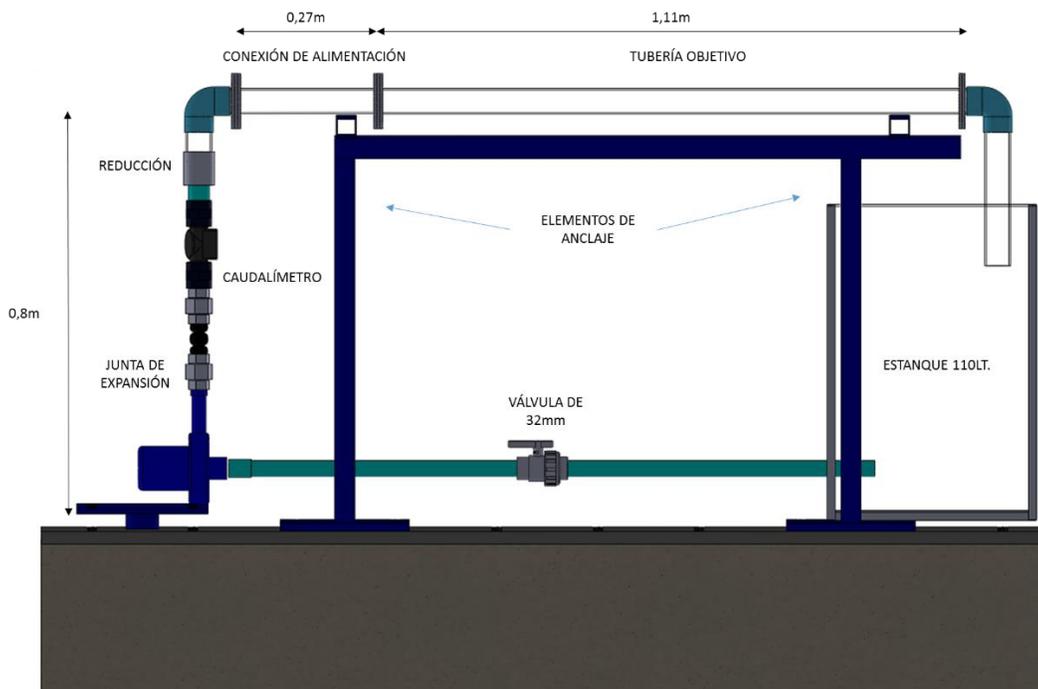


Figura 3-1: Instalación, modelo CAD.

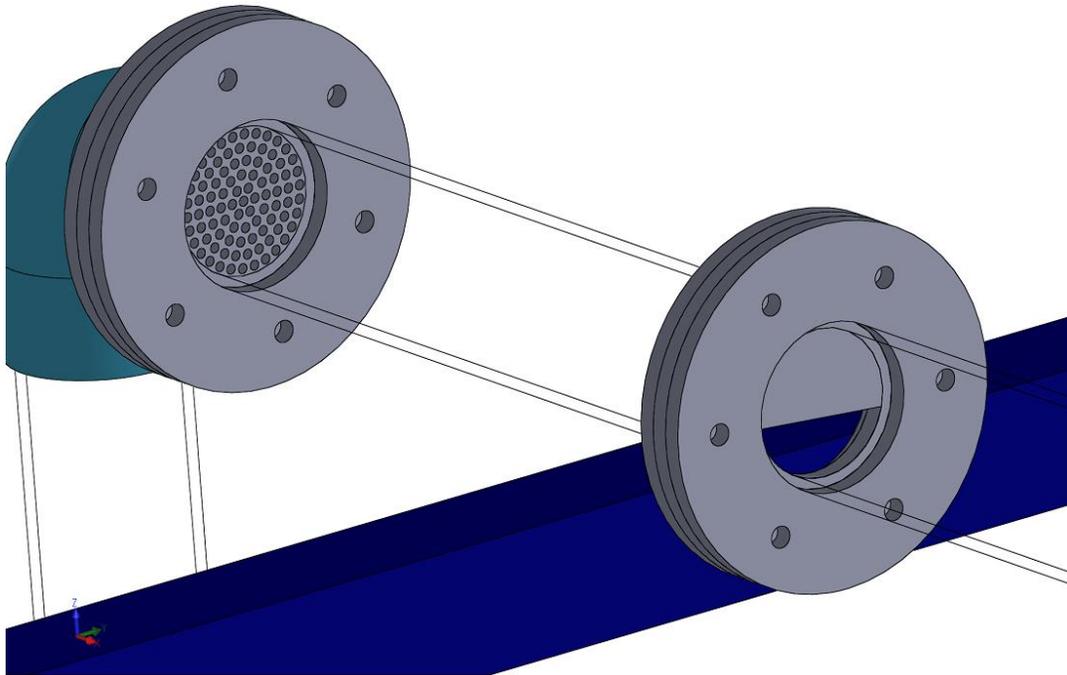


Figura 3-2: Placa perforada entre la tubería de alimentación y la tubería objetivo.

Antes de la tubería objetivo se dispone de placas con una cierta razón de llenado para garantizar el flujo con superficie libre necesario, como se muestra en la Figura 3-2. La tubería objetivo tiene un largo de 1,11 m (aproximadamente veinticinco veces el diámetro interno de la tubería).

Al final de la tubería objetivo, como se muestra en Figura 3-3, se dispone de placas perforadas para forzar la aparición del salto hidráulico.

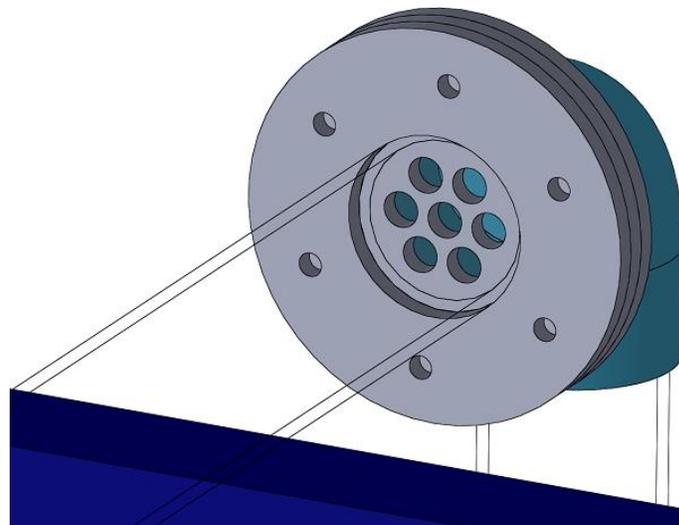


Figura 3-3: Placa perforada al final de la tubería objetivo.

Al final del tramo de caída, se dispone de una válvula de bola (no mostrada en la Figura 3-1). Esta válvula tiene por función la de llenar la tubería con cierto nivel de agua para realizar mediciones con el flujo detenido.

3.1.1 Selección del diámetro de la tubería de pruebas

El criterio para la selección del diámetro interno de la tubería de pruebas es conseguir un caudal para la condición de *choking* que cumpla con:

- Estar por debajo del caudal máximo proporcionado por la bomba centrífuga a disposición.
- Al considerar distintas razones de llenado $y = h/D$, el caudal de *choking* debe dejar un margen de caudal para el estudio de la vibración de la tubería con respecto a la velocidad del flujo.

Se dispone de una bomba centrífuga de potencia 1[hp] y velocidad 2800[rpm]. Bombas de similares características proporcionan un caudal nominal de $\sim 2,2 \left[\frac{L}{s}\right]$, valor considerado para la selección del diámetro interno.

Para la construcción del módulo experimental, se planea la utilización de una tubería de acrílico transparente como tubería de pruebas. Considerando diámetros comerciales, se procedió a calcular, para distintas y , los caudales de *choking* necesarios según la relación de la Ecuación 29. La Tabla 3-1 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3-1: Profundidad de entrada h_1 y caudal de *Choking* Q_c para distintas razones de llenado f

y	$D = 1$ [pulg.]		$D = 1\frac{3}{4}$ [pulg.]		$D = 2$ [pulg.]		$D = 2\frac{3}{4}$ [pulg.]	
	h_1 [mm]	Q_c [L/s]	h_1 [mm]	Q_c [L/s]	h_1 [mm]	Q_c [L/s]	h_1 [mm]	Q_c [L/s]
0,1	2,54	0,032	4,45	0,13	5,8	0,25	6,99	0,40
0,2	5,08	0,064	8,89	0,26	11,6	0,51	13,97	0,81
0,3	7,62	0,097	13,33	0,39	17,4	0,76	20,96	1,21
0,4	10,16	0,129	17,78	0,52	23,2	1,01	27,94	1,61
0,5	12,70	0,161	22,23	0,65	29	1,27	34,93	2,02
0,6	15,24	0,193	26,67	0,78	34,8	1,52	41,91	2,42

Se considerará un diámetro interno de 1 3/4 pulgadas. La razón de llenado y irá desde 0,3 a 0,6. Como resultado, se obtiene un $\Delta Q_{m\acute{a}x} = 1.81 \left[\frac{L}{s}\right]$ para realizar los experimentos.

3.1.2 Placas perforadas

Se diseñaron placas perforadas para la realización de los experimentos. Se disponen de cuatro placas con razones de profundidad distintas, las que se muestran en la Figura 3-4.

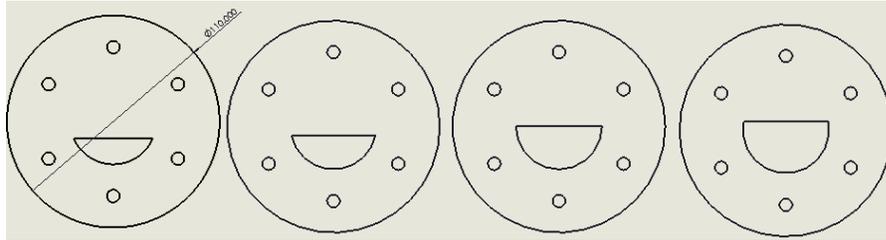


Figura 3-4: Placas perforadas. De izquierda a derecha, razones de llenado $f = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$. Medidas en milímetros.

Se dispone de placas con distintos patrones de perforaciones circulares como se muestra en la Figura 3-5. Estas se utilizan para cumplir con la condición de flujo laminar y forzar la ocurrencia del salto hidráulico al disponerlas en el extremo que une la tubería objetivo con la caída de agua.

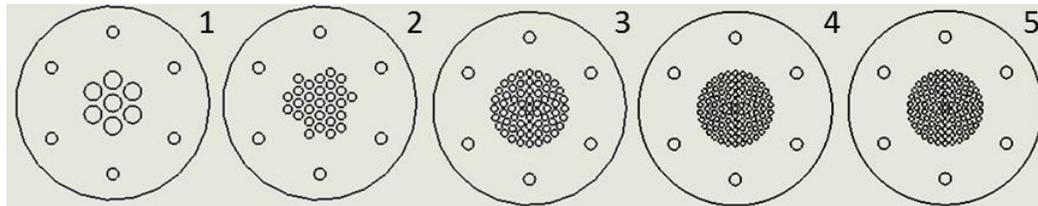


Figura 3-5: Placas perforadas. Distintos patrones de perforaciones circulares para la obstrucción del flujo.

3.1.3 Construcción

En la Figura 3-6 se muestra la instalación construida. En la Figura 3-7 se muestran los elementos estructurales. Los cuatro soportes de la instalación se encuentran soldados a las bases y anclados a la plataforma de concreto con pernos. Las vigas que sostienen la tubería objetivo se encuentran fijadas a los soportes mediante prensas para facilitar su movimiento.



Figura 3-6: Instalación Experimental.

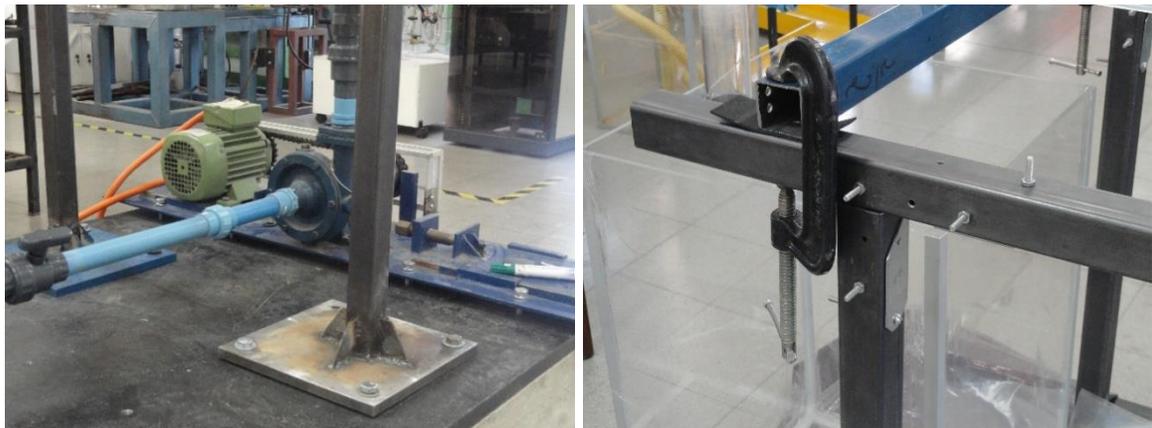


Figura 3-7: Elementos Estructurales

En la Figura 3-8 se muestra la tubería de alimentación donde se aprecian sus componentes: válvula de bola 32mm, caudalímetro y reducción (en azul).

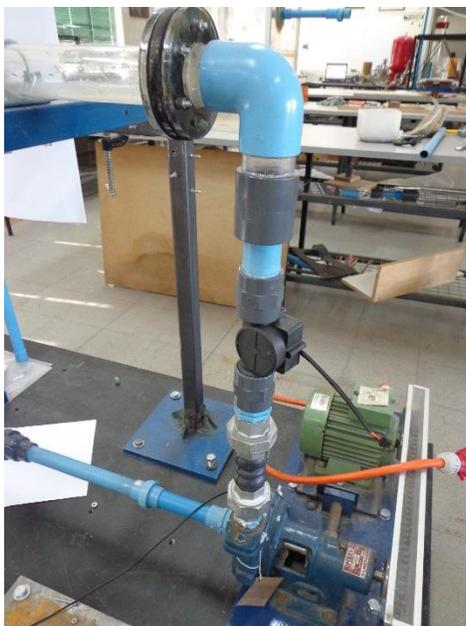


Figura 3-8: Tubería de alimentación.

En la Figura 3-9 se muestran los flanges y placas perforadas utilizados. Para las empaquetaduras entre flanges se utilizó goma comercial de 3 mm de espesor. Se utilizó pegamento Weld-on® 16 Acrylics para soldar los elementos de acrílico entre sí. Finalmente en la Figura 3-10 se muestra el estanque de acrílico, de capacidad 110 litros, y la tubería de succión. Se utilizó pegamento especial para acrílicos y silicona en el sellado del estanque.



Figura 3-9: Flanges.



Figura 3-10: Estanque y tubería de succión.

3.2 Instrumentación

Para las mediciones de aceleración en las paredes de la tubería en la zona del salto hidráulico se dispone de acelerómetros marca PCB *Piezotronics*TM y de una consola de adquisición de datos marca ECON, Avant® series. En la Tabla 3-2 se enlistan las características de los sensores.

Tabla 3-2: Características acelerómetros

Parámetro	Característica
Sensibilidad	$(\pm 10\%)100 \text{ mV/g}$ ($10.2 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$)
Rango de medición	$\pm 50 g_{pk}$
Resolución	$0.00015 g_{RMS}$ ($0.0015 \text{ m/s}^2_{RMS}$)
Rango de frecuencia	0.5 a 3000 Hz
Montaje	Adhesivo

Para medir el caudal se cuenta con un caudalímetro G1-1/4", el cual se puede apreciar en la Figura 3-8. Sus características se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Características caudalímetro

Parámetro	Característica
Relación Frecuencia-Caudal	$f = 6Q [L/min]$, error $\pm 2\%$
Voltaje	3.5 – 24VDC
Amperaje	< 10mA
Rango de caudal	1 – 120 L/min

4 Metodología

4.1 Caracterización de las vibraciones

Para caracterizar las vibraciones producidas por distintos tipos de salto hidráulico (SH) se consideraron las siguientes actividades en orden secuencial:

- Realización de ensayos de impacto en la tubería, para la determinación del comportamiento de la respuesta natural con respecto a la cantidad de agua.
- Medición del nivel de vibraciones en la tubería, representado por el valor RMS de la aceleración, para las distintas razones de llenado con una distancia entre soportes fija, variando el número de Froude al incrementar el caudal. Construcción de una gráfica que muestre los resultados de los ensayos para el estudio del comportamiento del nivel de vibraciones en función del número de Froude.
- Realización de ensayos sin forzar la aparición del SH y medición de las vibraciones.
- Cálculo de la densidad de potencia espectral (PSD) de la tubería para los ensayos realizados, tanto con y sin SH. Comparación de la PSD de los ensayos con SH con el de la respuesta natural de la tubería y con el de los ensayos sin SH.
- Estudio de los espectros de las mediciones realizadas para la búsqueda de frecuencias características del fenómeno. Comparación de los espectros mencionados con el espectro de la bomba centrífuga y con el de los ensayos sin SH.
- Para una razón de llenado específica, medición del nivel de vibraciones acortando la distancia entre los soportes para distintos números de Froude.
- Estudio del efecto de disminuir la distancia entre soportes en el nivel de vibraciones.

Tabla 4-2 se muestran las características de cada medición realizada.

Tabla 4-1: Ensayo $\gamma = 0.3$, $\gamma = 0.4$. Frecuencia del motor, caudal y número de Froude

<i>N</i> ^o	ENSAYO $\gamma=0.3$			ENSAYO $\gamma=0.4$		
	<i>H</i> _z	<i>L</i> / _s	<i>F</i>	<i>H</i> _z	<i>L</i> / _s	<i>F</i>
1	10.7	0.41	3.47	11.6	0.48	2.29
2	11.6	0.48	4.07	12.8	0.57	2.74
3	12.6	0.56	4.73	13.5	0.63	3
4	13.5	0.63	5.33	14	0.66	3.19
5	14.2	0.68	5.8	14.5	0.7	3.37
6	15	0.74	6.33	15	0.74	3.56
7	16.1	0.83	7.06	15.4	0.77	3.71
8	16.6	0.87	7.4	15.8	0.81	3.86
9	17	0.9	7.66	16.3	0.84	4.05
10	-	-	-	16.6	0.87	4.16
11	-	-	-	16.8	0.88	4.24
12	-	-	-	17.7	0.95	4.57
13	-	-	-	18.2	0.99	4.76
14	-	-	-	19.2	1.07	5.14

Tabla 4-2: Ensayos $\gamma = 0.5, \gamma = 0.6$. Frecuencia del motor, caudal y número de Froude

N°	ENSAYO $\gamma=0.5$			ENSAYO $\gamma=0.6$		
	Hz	L/s	F	Hz	L/s	F
1	11.8	0.49	1.51	13.3	0.61	1.3
2	12.6	0.56	1.7	13.7	0.64	1.37
3	13.5	0.63	1.92	14.2	0.68	1.45
4	14.5	0.7	2.16	14.5	0.7	1.5
5	15.8	0.81	2.47	15.2	0.76	1.62
6	16.1	0.83	2.54	16.3	0.84	1.8
7	16.6	0.87	2.66	17.5	0.94	2
8	17.5	0.94	2.88	18	0.98	2.08
9	17.7	0.95	2.93	18.7	1.03	2.2
10	18.2	0.99	3.05	19.8	1.12	2.38
11	19	1.06	3.24	20.1	1.14	2.43
12	19.2	1.07	3.29	21.3	1.24	2.63
13	20	1.13	3.48	21.7	1.27	2.7
14	21.3	1.24	3.79	24.4	1.48	3.15
15	21.7	1.27	3.89	25.3	1.55	3.3
16	24	1.45	4.44	25.7	1.6	3.37

Por otra parte, también se realizaron ensayos sin forzar la aparición del salto hidráulico. Esto se hizo para contrastar los espectros e identificar zonas de frecuencias características del salto

Se realizó un test de impacto con el objetivo de determinar la respuesta natural de la tubería. El test se realizó para tres niveles de agua, como se muestra en la Figura 4-2.

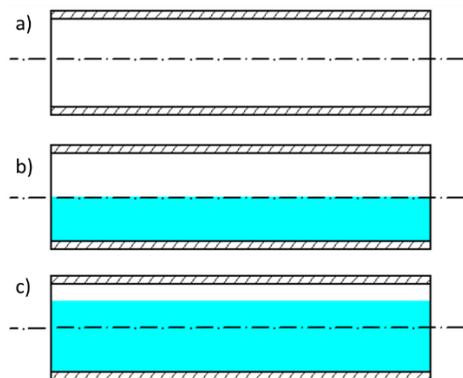


Figura 4-2: Niveles de agua para test de impacto. a) Vacío, b) Medio, c) Semi-completo (aprox. 75%).

Por otra parte, para estudiar la influencia de la distancia de los soportes en el nivel de las vibraciones de la tubería se realizó un ensayo variando la distancia entre los soportes para la razón de llenado $\gamma = 0.5$. La nueva disposición de los soportes se

muestra en la figura. La distancia se acortó a 70 cm. El sensor número 4 se mantuvo en la posición utilizada para los ensayos descritos anteriormente.

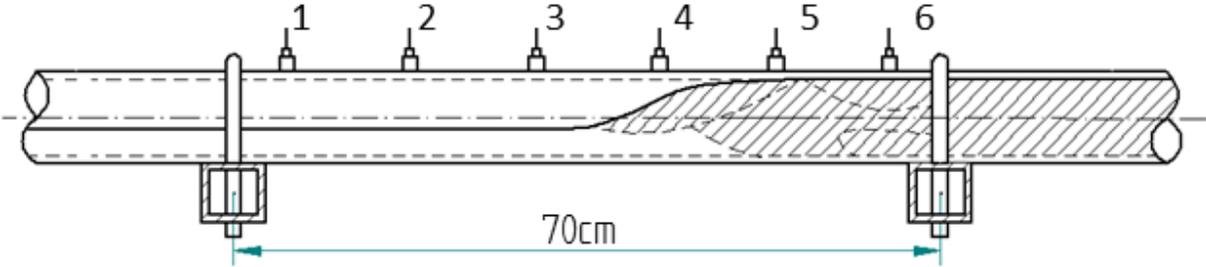


Figura 4-3: Ensayo con variación de distancia entre soportes. Disposición de sensores.

5 Resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados experimentales obtenidos en la instalación según la metodología del capítulo 4. En la sección 5.1 se presenta el resultado del ensayo de impacto en la tubería objetivo. Se muestra el contenido en frecuencia de la respuesta identificándose las frecuencias propias de la estructura. En la sección 5.2 se estudia el espectro de la bomba centrífuga en funcionamiento. Finalmente, en la sección 5.3, se describe el comportamiento de los acelerómetros dispuestos en la tubería. Esto se hace analizando los valores RMS (raíz cuadrática media) de las series temporales obtenidas para la aceleración y las densidades de potencia espectral (PSD).

5.1 Ensayo de Impacto

Se llevaron a cabo ensayos de impacto en la tubería, con la disposición de sensores mostrada en la Figura 4-1 y los niveles de agua mostrados en la Figura 4-2. Para medir la respuesta de la tubería se realizaron treinta golpes con un martillo en una zona cercana al sensor 1. Los resultados fueron promediados entre sí para disminuir los efectos del ruido experimental. Del ensayo se obtuvieron series temporales, la potencia espectral, la función coherencia y la función de respuesta en frecuencia para cada sensor. En las figuras 5-1, 5-2 y 5-3 se muestran las respuestas de la tubería (PSD) para los distintos niveles de agua.

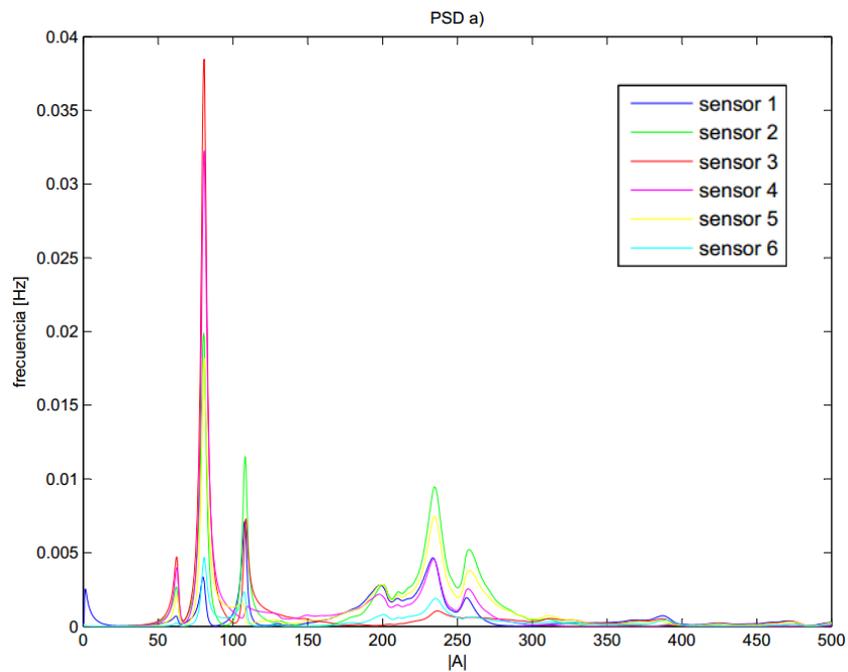


Figura 5-1: Respuesta natural de la tubería vacía.

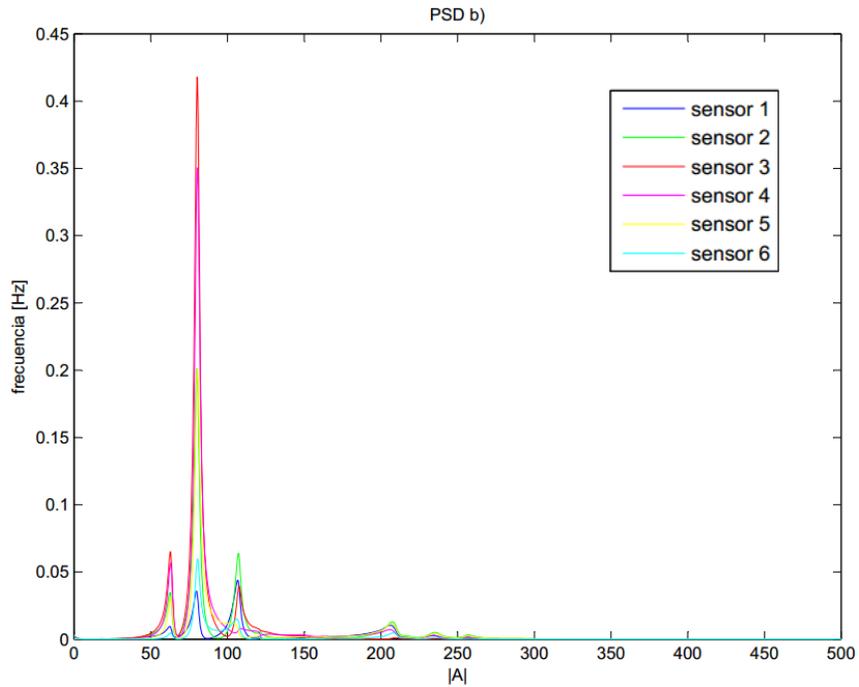


Figura 5-2: Respuesta de la tubería con nivel medio de agua.

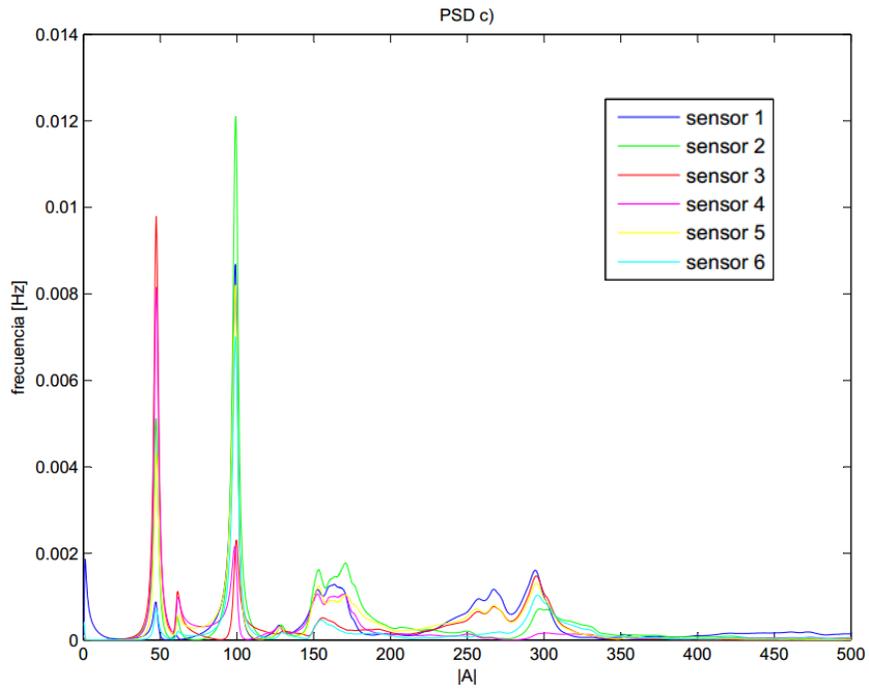


Figura 5-3: Respuesta de la tubería con nivel semi-completo

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, las frecuencias características de la tubería se encuentran por debajo de los 400Hz. Por otra parte, se observan entre cuatro y cinco posibles peaks característicos.

A través de los espectros no se puede determinar el real efecto que posee el aumento de agua en la respuesta de la tubería ya que no se tiene información del modo de vibración correspondiente a cada frecuencia.

Un aumento en el nivel del agua en la estructura significa una mayor masa, por lo que a niveles mayores de líquido se espera un desplazamiento de los peaks característicos hacia la izquierda, es decir, que disminuyan las frecuencias naturales.

Para verificar esto se realizó un análisis modal. Cada frecuencia característica tiene un modo asociado, por lo que al obtener los modos y estudiar la similitud entre estos es posible percibir el efecto del aumento de agua en el comportamiento de la tubería. Usando el software FEMTools® se determinaron, a través de las funciones de respuesta en frecuencia, los modos de la tubería para los distintos niveles de agua utilizados. Con los datos del ensayo de impacto se determinaron cinco modos para cada nivel de agua. Las formas de los modos se muestran en las Figuras 5-4, 5-5 y 5-6. Las frecuencias naturales para cada modo y ensayo se muestran en la Tabla 5-1.

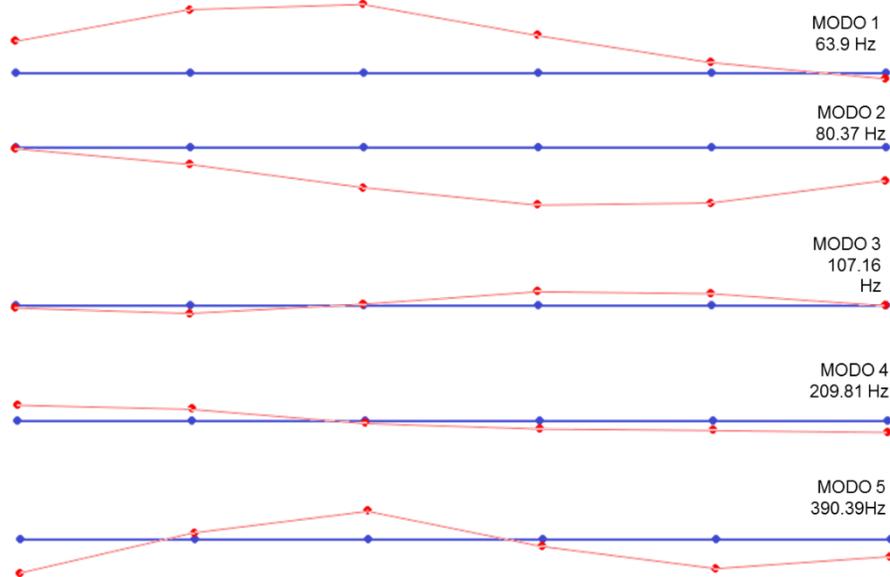


Figura 5-5: Modos de vibrar. Tubería nivel medio

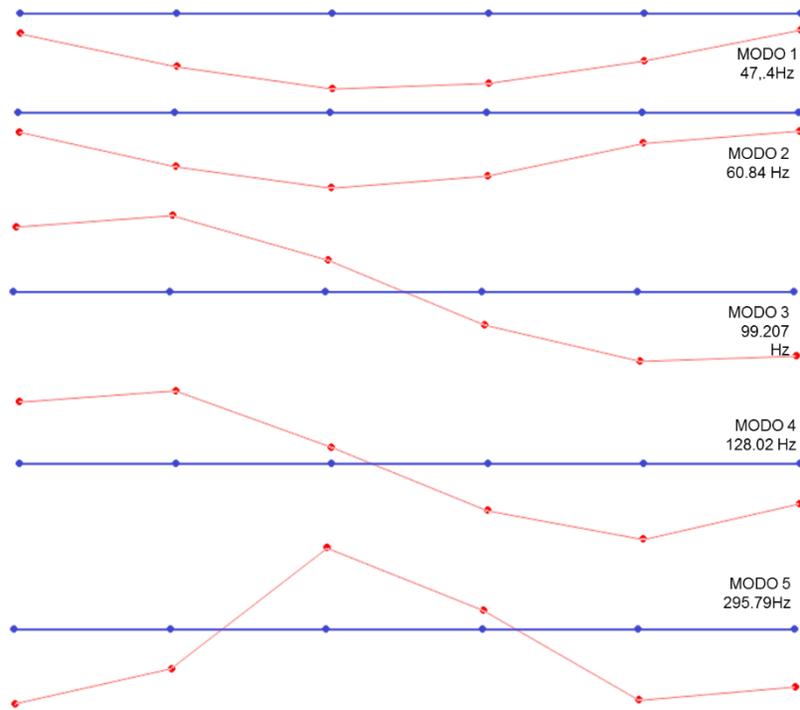


Figura 5-6: Modos de vibrar. Tubería semi-llena.

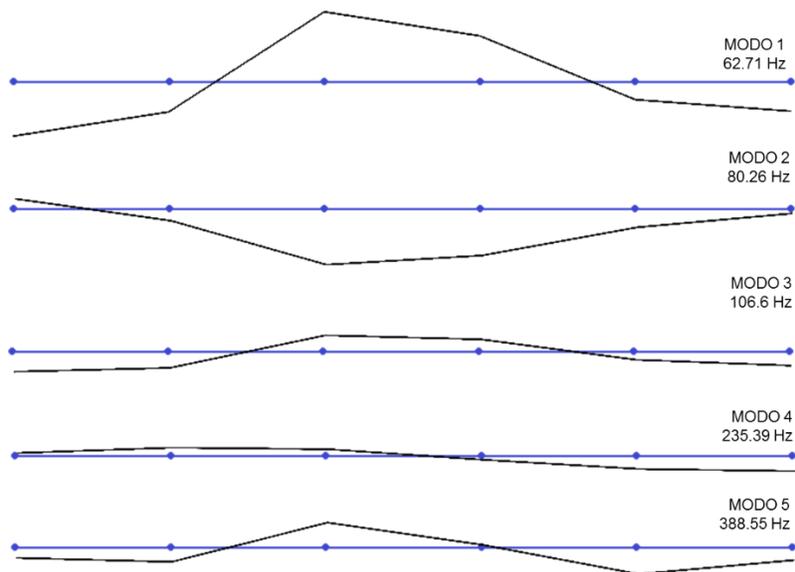


Figura 5-4: Modos de vibrar. Tubería sin agua

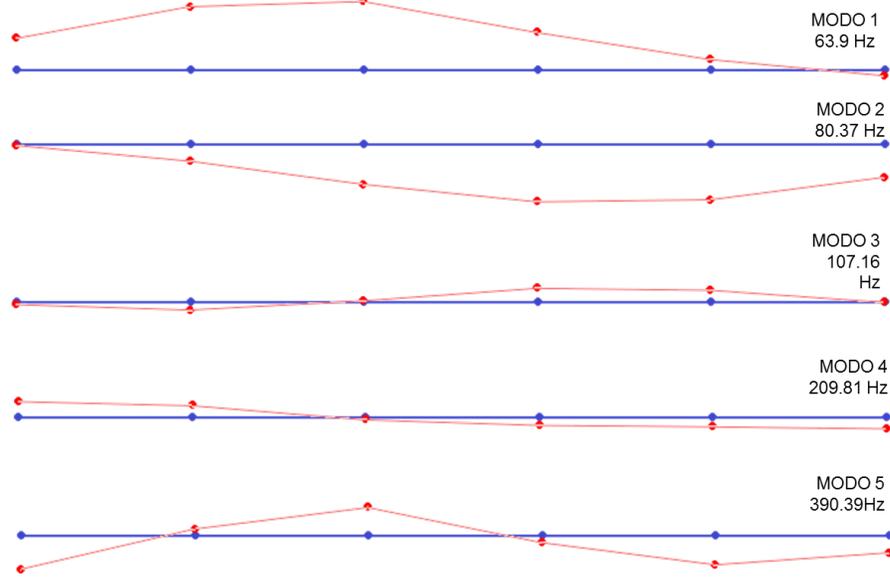


Figura 5-5: Modos de vibrar. Tubería nivel medio

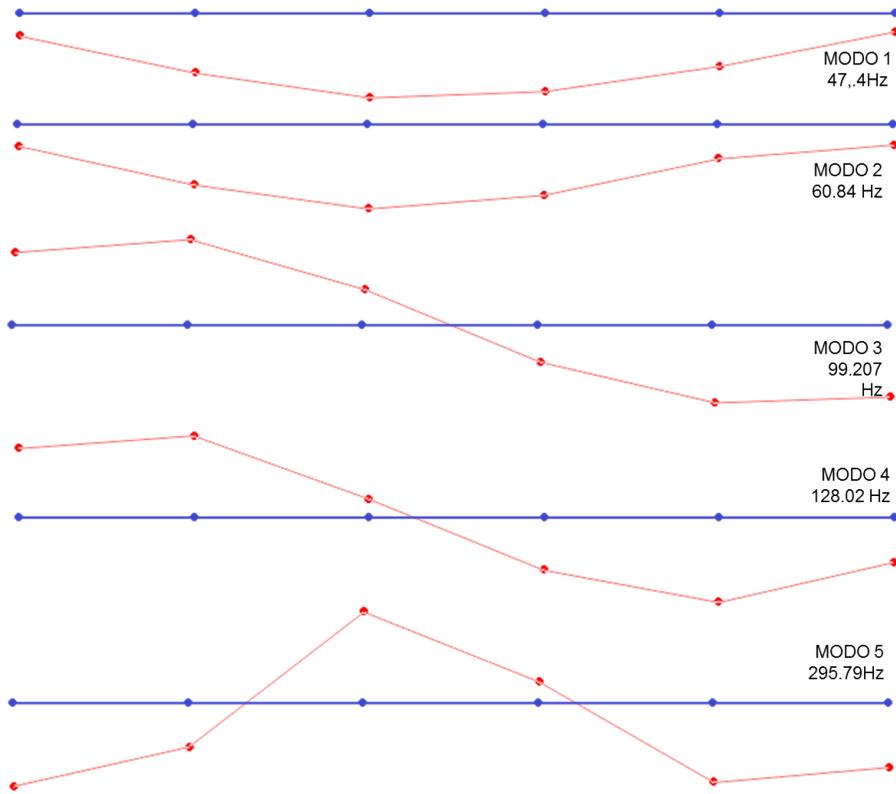


Figura 5-6: Modos de vibrar. Tubería semi-llena.

Tabla 5-1: Modos y frecuencias naturales

	A	B	C
<i>Modo</i>	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	62,71	63,90	47,4
2	80,26	80,37	60,84
3	106,6	107,16	99,21
4	235,39	209,81	128,02
5	388,55	390,39	295,79

Se correlacionaron los modos a través del MAC (Modal Assurance Criterion) con el software FEMTools®. Este método permite correlacionar los modos fijándose únicamente en la forma. El indicador toma valores entre 0 y 100%, donde el 0 representa que no existe correlación, y el 100 que los modos están perfectamente correlacionados. En las Figuras 5-7 y 5-8 se muestran la gráficas del MAC para la correlación de los modos obtenidos para la tubería sin agua y con nivel medio, y para la tubería sin agua y semi-llena respectivamente. En las tablas 5-2 y 5-3 se muestran los modos que se correlacionan entre sí según el criterio del MAC para cada ensayo realizado.

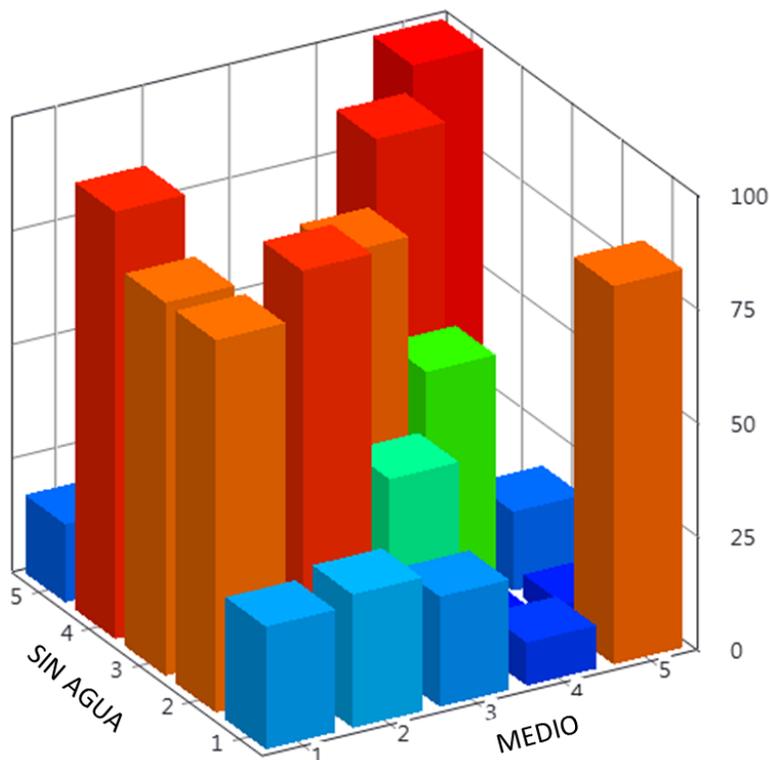


Figura 5-7: Correlación entre modos. Tubería sin agua y con nivel medio. Gráfica del MAC.

Tabla 5-2: Correlación entre modos. Tubería sin agua y con nivel medio

Modo	Hz	Modo	Hz	Diff (%)	MAC
2	80,26	2	80,37	0,14	92,43
3	106,6	3	107,16	0,37	83,44
4	235,39	4	209,81	12,1	95,84
5	388,55	5	390,39	0,47	99,37

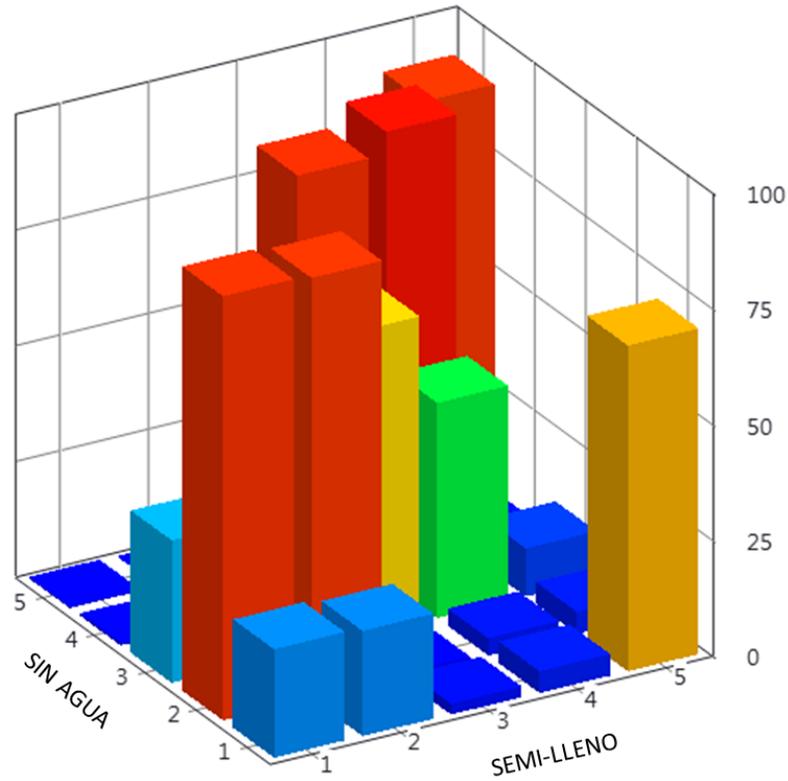


Figura 5-8: Correlación entre modos. Tubería sin agua y semi-llena. Gráfica del MAC

Tabla 5-3: Correlación entre modos. Tubería sin agua y semi-llena

Modo	Hz	Modo	Hz	Diff (%)	MAC
2	80,26	1	47,4	69,3	91,54
3	106,6	3	99,207	7,61	66,08
4	235,39	4	128,02	83,86	96,91
5	388,55	5	295,79	31,35	90,69

De la Tabla 5-2 , al comparar la tubería sin agua y con nivel medio, se observa que cuatro de los cinco modos obtenidos se correlacionan con índices MAC altos. Las diferencias entre las frecuencias naturales de los modos son bajas, a excepción del modo 4, en donde se observa una disminución significativa. Esto se condice con lo esperado, ya que al menos uno de los modos disminuyó su frecuencia natural.

Por otra parte, en la Tabla 5-3 se puede observar que si bien se da una correlación de los modos con índices de MAC altos, en este ensayo se observan diferencias importantes entre las frecuencias naturales. Se aprecia una disminución significativa de la frecuencia natural asociada a cada modo, lo cual refleja el efecto esperado del agua en la respuesta de la tubería.

Con los resultados obtenidos en el test de impacto se pueden destacar los siguientes aspectos de la respuesta natural de la tubería con agua para el análisis posterior del salto hidráulico:

- Las frecuencias naturales de la tubería con agua se encuentran por debajo de los 400 Hz.
- Al aumentar el nivel de agua al interior de la tubería, las frecuencias naturales se desplazan hacia la izquierda.

5.2 Análisis del espectro de la bomba centrífuga en funcionamiento

Se analizó el espectro de la bomba centrífuga en funcionamiento conectándola a una manguera. Esto se realizó con la finalidad de reconocer las frecuencias características de la bomba impulsando agua para el posterior análisis de las vibraciones producidas por el SH.

Se realizaron ensayos para frecuencias de rotación del motor desde 12Hz a 24Hz. Los espectros obtenidos se muestran en la Figura 5-9. Se analizaron frecuencias bajo los 500Hz.

Se identificaron peaks a múltiplos de la frecuencia de rotación del motor. Las frecuencias encontradas se dan en los múltiplos: 1.76X, 3.5X, 6X, 7X, 10.5X, 12.6X y 21.1X.

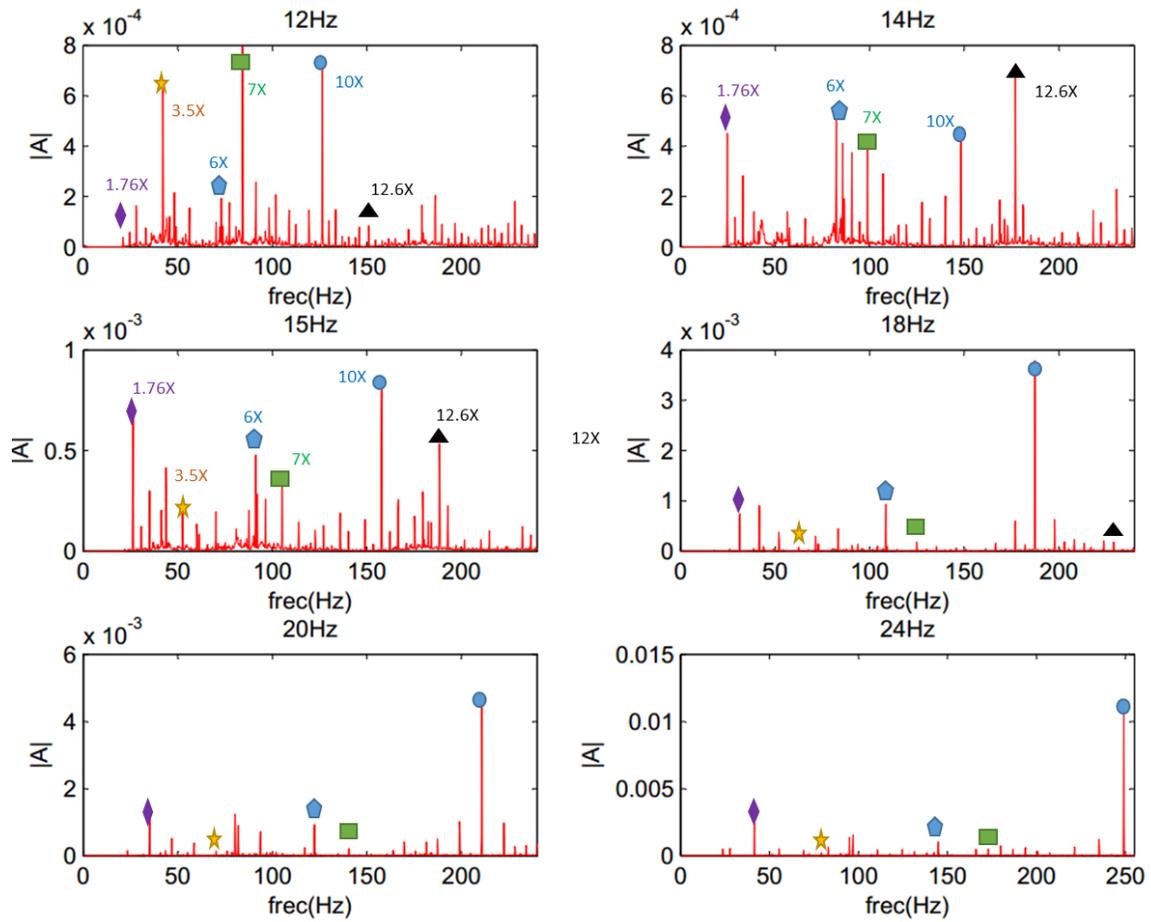


Figura 5-9: Espectros bomba centrífuga. Los símbolos identifican las frecuencias de resonancia. Se tienen armónicos (de izquierda a derecha): 1.76X, 3.5X, 6X, 7X, 10.5X, 12.6X y 21.1X (no mostrado en las gráficas).

5.3 Vibraciones producidas por saltos hidráulicos

Con la consola de adquisición se obtuvieron datos de aceleración y caudal. Los que fueron procesados con el software *Data Acquisition Analysis*. Se utilizó una frecuencia de muestreo de 5200 Hz, una resolución en frecuencia de 0.3Hz, y una duración para la adquisición de 3.2 segundos. Para cada serie temporal de aceleración se calculó la transformada de Fourier y la densidad de potencia espectral. Se realizaron 20 promedios por medición para la obtención de las funciones mencionadas. A cada medición se aplicó una ventana tipo *hanning* para disminuir los efectos del ruido y leakage. Los datos posteriormente fueron procesados en MATLAB para su visualización. Se computó el valor RMS de las series temporales de la aceleración, el cual se denota por A_{RMS} , dividiendo la norma del vector aceleración por la raíz de su largo. Se consideró analizar los datos obtenidos por el sensor número 4 de la Figura 4-1 por su ubicación central. Por otra parte, para graficar la densidad de potencia espectral de las mediciones realizadas se normalizaron los datos obtenidos por la frecuencia de muestreo, lo cual se denota por A_{norm} .

5.3.1 Densidad de potencia espectral

Se midió la densidad de potencia espectral para cada razón de llenado en un rango de números de Froude según la metodología expuesta en el capítulo 4. A continuación se muestran y discuten los resultados obtenidos para cada razón de llenado.

5.3.1.1 $\gamma=0.3$

Para esta razón de llenado se realizaron ensayos en un rango de números de Froude desde 3.4 a 7.6, teniendo en consideración que se logra la condición de choking para un número de Froude igual a 3.3. Como se aprecia en la Figura 5-10, que muestra la progresión del salto hidráulico, en todos los ensayos se cumple la condición de choking.

En las figuras 5-11 a 5-15 se presentan las PSD tanto de la tubería experimentando choking (SH) como también las de esta sin el salto hidráulico (SSH). También se muestra la respuesta natural de tubería. Como se puede apreciar en las figuras 5-11 a 5-14, el nivel de vibraciones, representado por el valor RMS en la leyenda de los gráficos, siempre es mayor cuando está ocurriendo el choking. Esto último concuerda con lo esperado puesto que el SH conlleva una cantidad considerable de disipación de energía hacia las paredes de la tubería. Por otro lado, en todas las mediciones se tiene que a frecuencias sobre 500hz la PSD de la tubería experimentando choking decae como $f^{-5/3}$, lo cual es característico de las vibraciones producidas por turbulencia en tuberías. Se debe notar que el decaimiento, en la curva azul, se ajusta mejor a dicha relación al aumentar el

número de Froude puesto que se comienza a desarrollar de mejor forma el régimen turbulento.

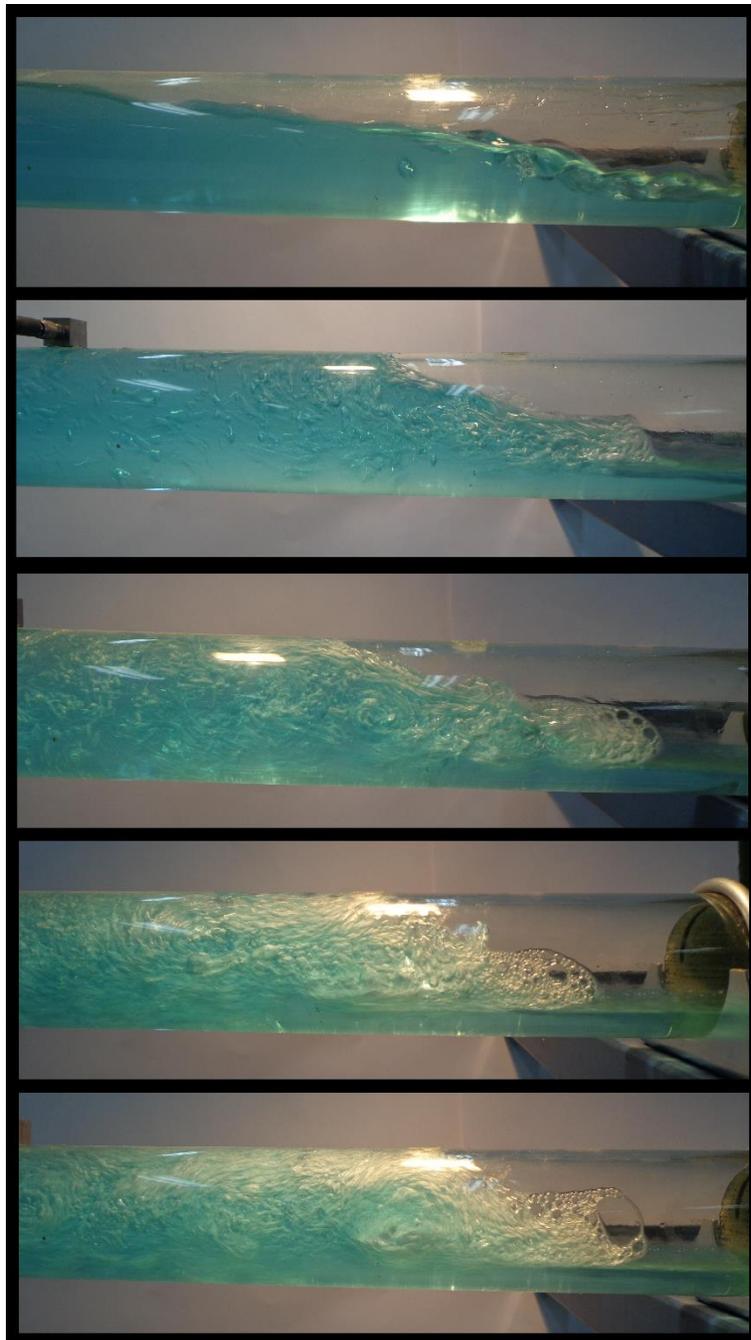


Figura 5-10: Salto hidráulico $y=0.3$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 3.47, 4.73, 5.8, 7.1, 7.6.

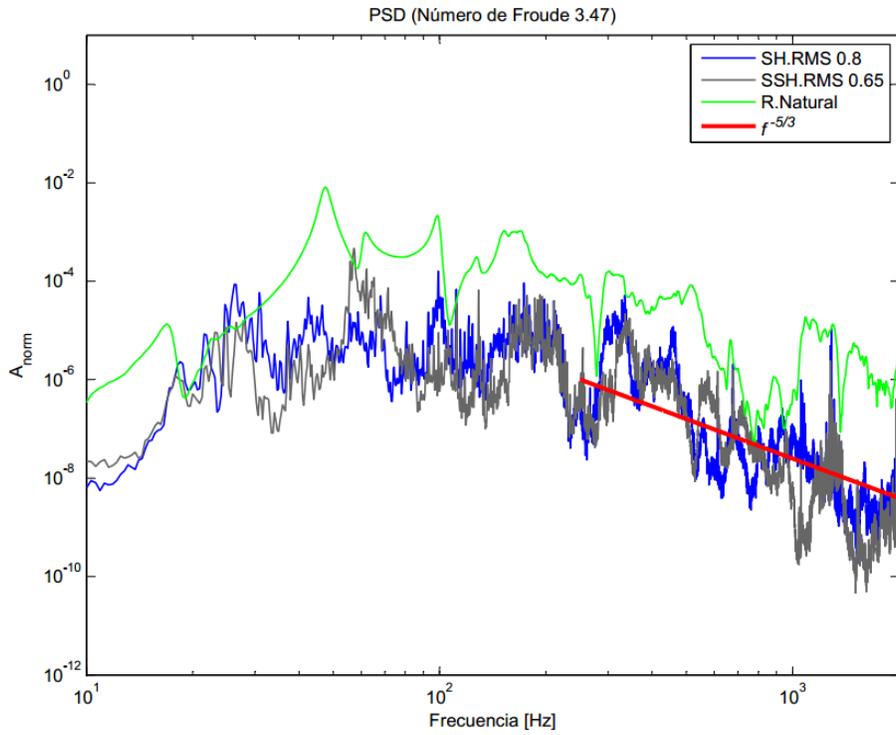


Figura 5-11: PSD $y=0.3$, Número de Froude 3.47. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f^{-5/3}$ (rojo).

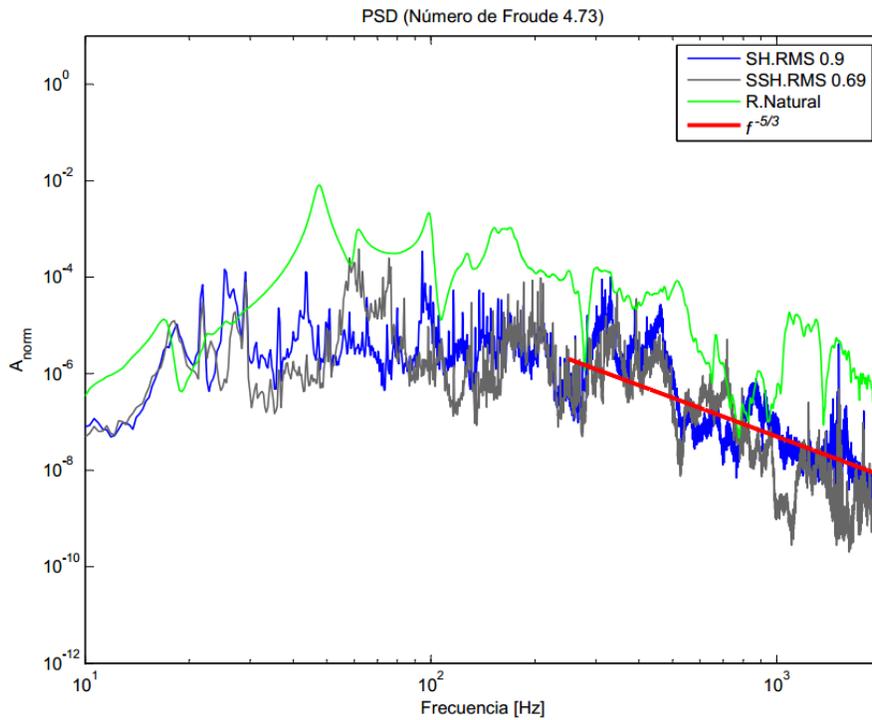


Figura 5-12: PSD $y=0.3$, Número de Froude 4.73. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f^{-5/3}$ (rojo).

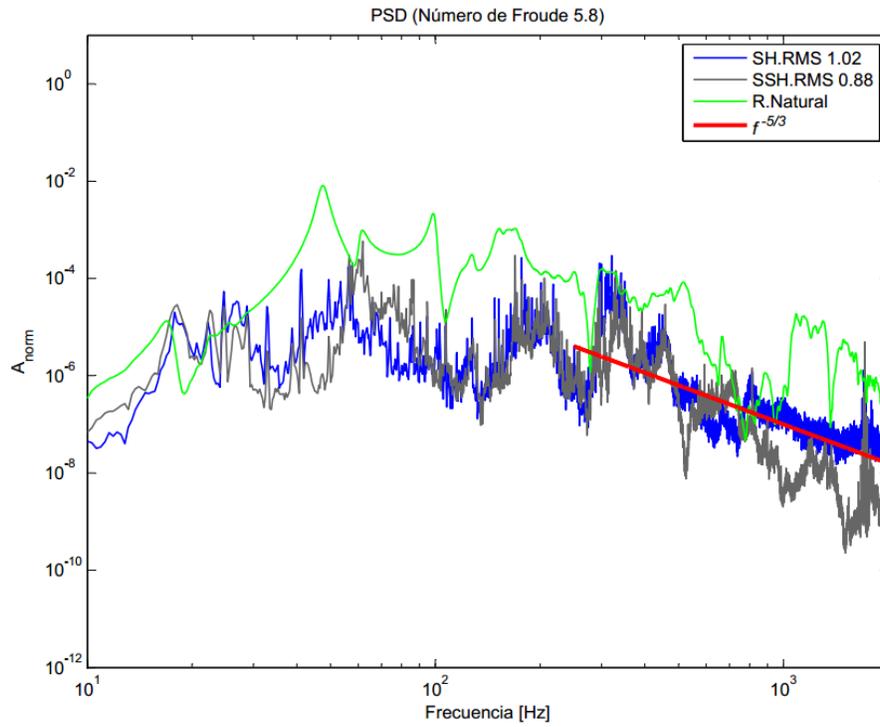


Figura 5-13: PSD $y=0.3$, Número de Froude 5.8. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f^{-5/3}$ (rojo).

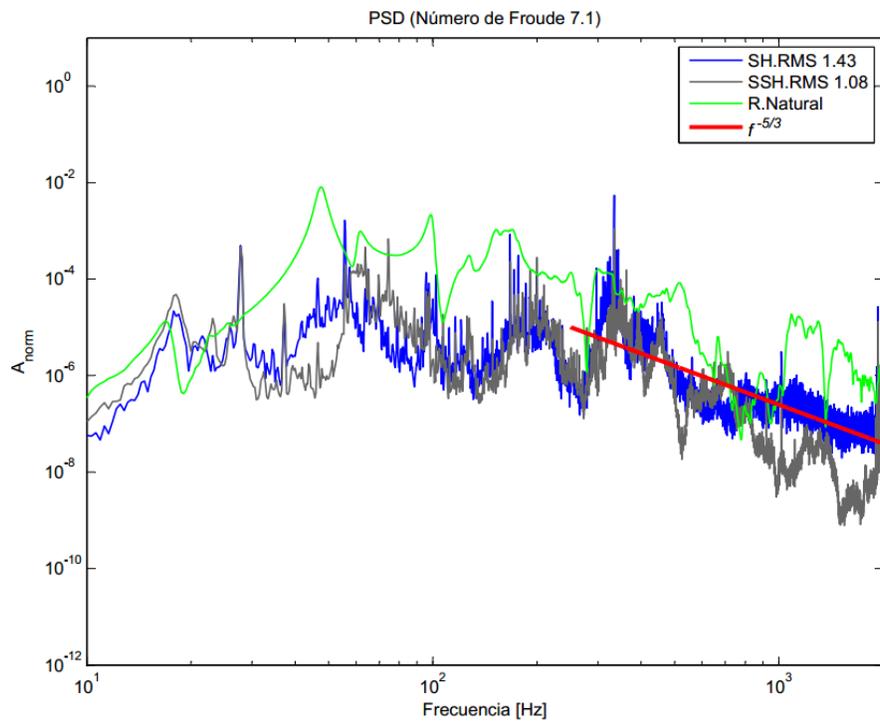


Figura 5-14: PSD $y=0.3$, Número de Froude 7.1. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). Sin salto (gris). $f^{-5/3}$ (rojo).

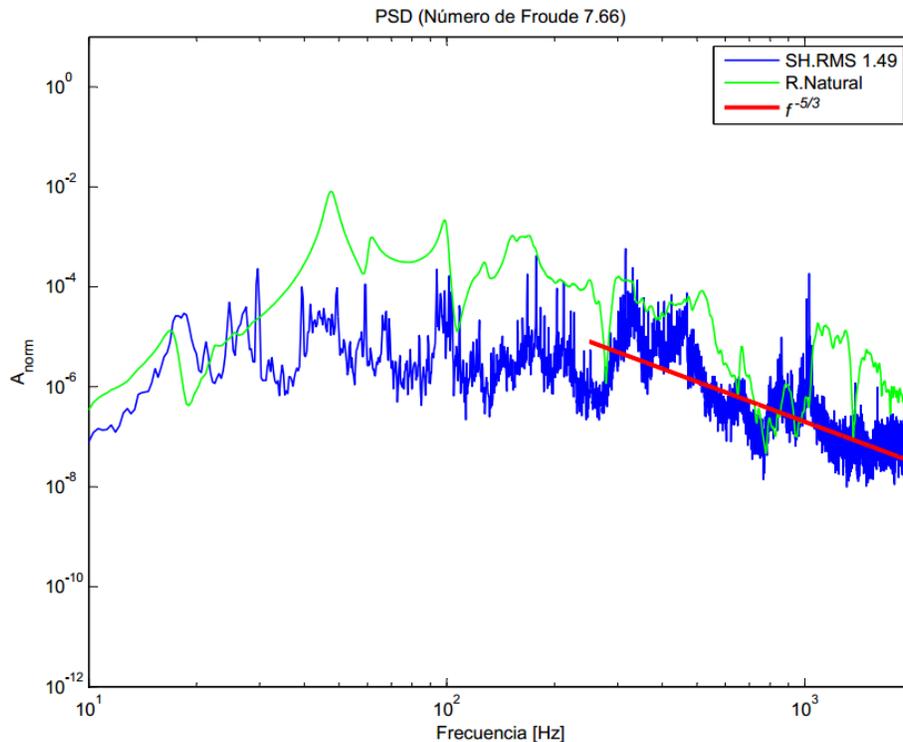


Figura 5-15: PSD $y=0.3$, Número de Froude 7.66. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

Se busca encontrar aspectos característicos del salto hidráulico en las gráficas, i.e. frecuencias de excitación que sean atribuibles y distingan este fenómeno o si se excitan frecuencias naturales de la estructura, las cuales se encuentran a frecuencias bajo los 150 Hz.

En las figuras 5-11 a 5-14 los espectros de la tubería con y sin salto muestran una tendencia similar a frecuencias mayores a 200hz. Sin embargo, se tienen diferencias en amplitud para el rango de frecuencias entre 300 y 500 Hz, y también que la gráfica gris no se ajusta a la ley de decaimiento $f^{-5/3}$. Por otra parte, ambas gráficas exhiben una resonancia similar en amplitud y frecuencia sobre los 1000hz.

Las principales diferencias de amplitud y frecuencia entre los espectros suceden en el rango 10-200hz. Para números de Froude entre 3.47 y 5.33 la gráfica azul tiene resonancias marcadas en frecuencias cercanas a los 100Hz, las cuales no se correlacionan con las resonancias encontradas en la bomba centrífuga, no están presente en la gráfica gris y se encuentran cercanas a una de las frecuencias características de la estructura. Para ese mismo intervalo de números de Froude, ambas gráficas presentan peaks en frecuencias similares y que son múltiplos de la frecuencia de rotación del motor utilizado (2.3X y 3.5X). En la Figura 5-16 **Error! Reference source not found.** se muestran los peaks a 2.3 y 3.5X para uno de los ensayos con salto. La frecuencia cercana a 100Hz se remarca con una estrella. Para los números de Froude entre 5.8 y 7.66, la gráfica azul presenta peaks en múltiplos de la frecuencia de rotación del motor, a saber: 1.7X, 3.5X, 10.5X y 21X,

los cuales también están presente en los espectros de la bomba centrífuga en funcionamiento (ver sección 5.2). Por otra parte, como se muestra en la Figura 5-17, entre los diversas peaks que se visualizan en los ensayos con flujo turbulento desarrollado (Números de Froude 7.4 y 7.66), aparece un peak a 6X de la frecuencia de rotación del motor, cercano a una de las frecuencias naturales de la estructura.

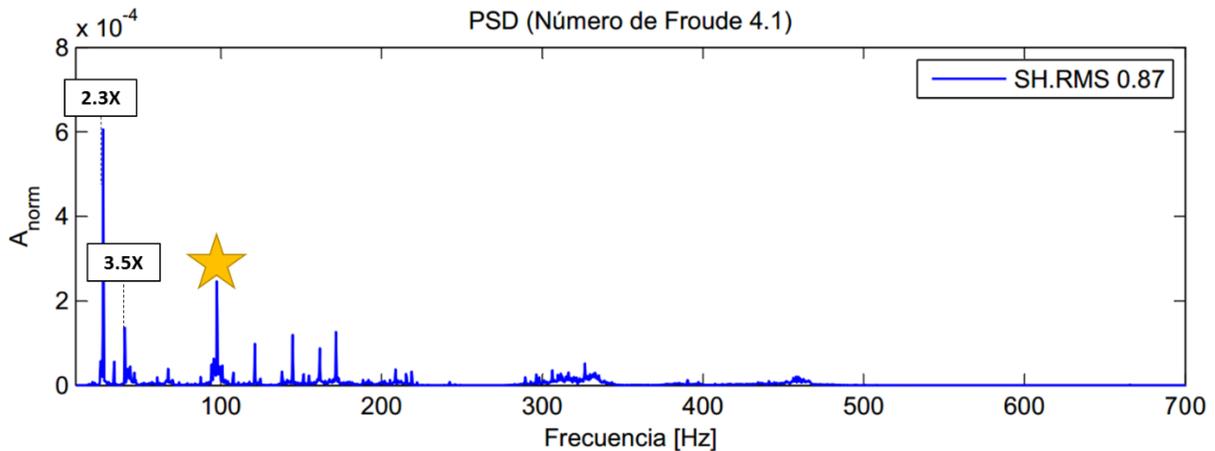


Figura 5-16: Espectro F=4.1.

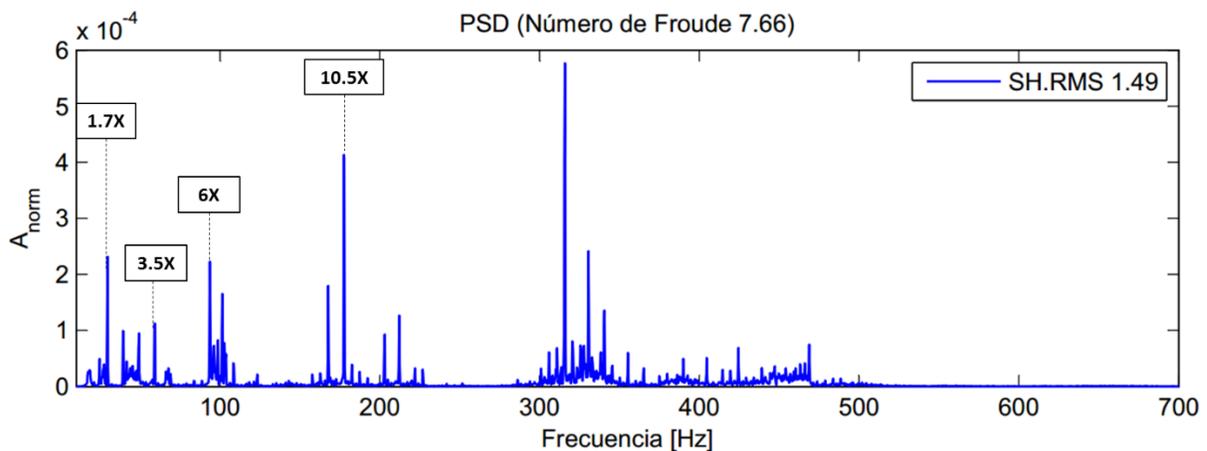


Figura 5-17: Espectro F=7.66.

5.3.1.2 $y=0.4$

Con esta razón de llenado se realizaron ensayos con números de Froude desde 2.29 a 5.14, teniendo en consideración que la condición de choking se tiene para un número de Froude igual a 2.5. En la Figura 5-18 se muestra la evolución del salto hidráulico al interior de la tubería desde antes de iniciado el choking, hasta la formación de un régimen turbulento.

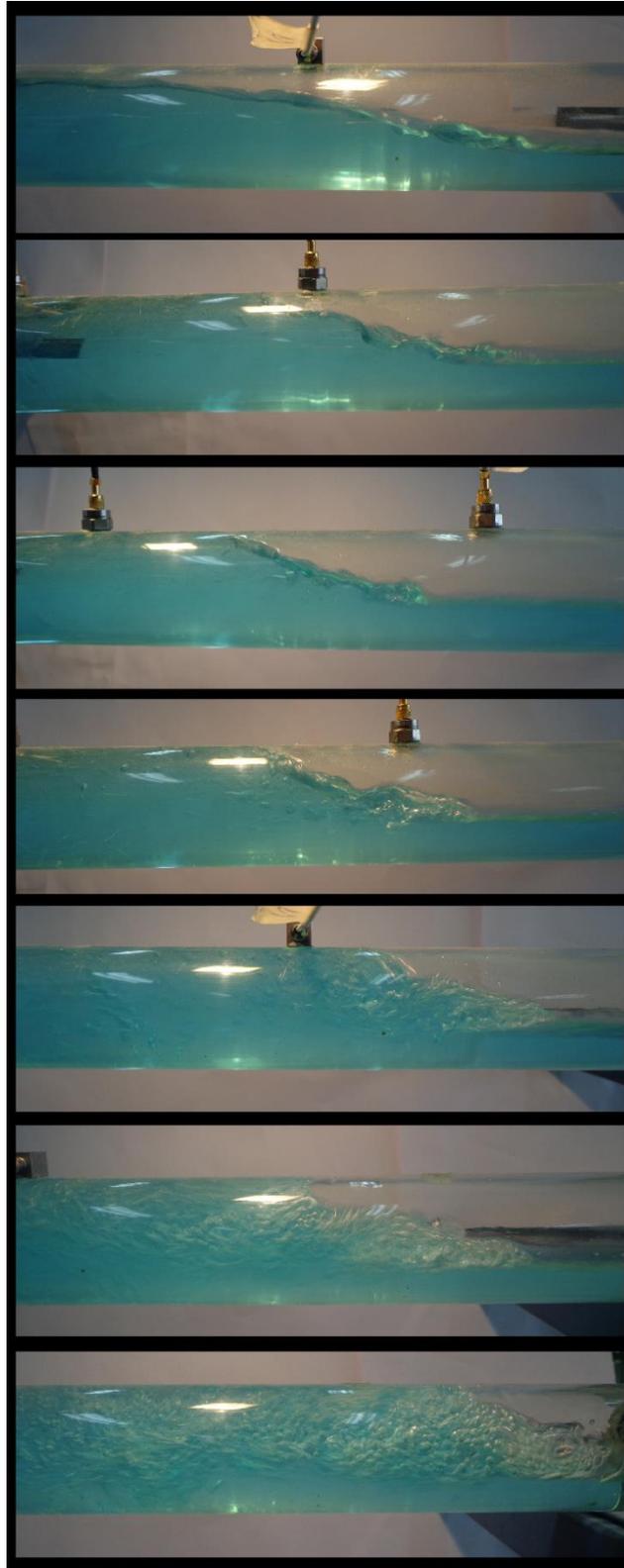


Figura 5-18: Salto hidráulico $y=0.4$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 2.29, 2.74, 3, 3.71, 4.76, 5.14.

Se midieron las PSD tanto de la tubería experimentando el salto hidráulico (SH) como de la tubería sin este (SSH) hasta un número de Froude igual a 3.71. En las figuras 5-19 a 5-26 se muestran las gráficas obtenidas. Se tiene la respuesta natural de la tubería en verde, el espectro de la tubería experimentando el salto hidráulico en azul, el espectro de la tubería sin salto en gris y se muestra la ley de decaimiento $f^{-5/3}$, característica de flujos turbulentos, en rojo. A medida que el número de Froude aumenta, y el régimen turbulento se desarrolla, el decaimiento de las vibraciones a altas frecuencias se ajusta de mejor forma a la ley mencionada. Por otra parte, en la leyenda de cada gráfica, se muestra el nivel promedio de las vibraciones en la tubería. Se tiene que para los ensayos con salto hidráulico el valor RMS de la aceleración es siempre mayor.

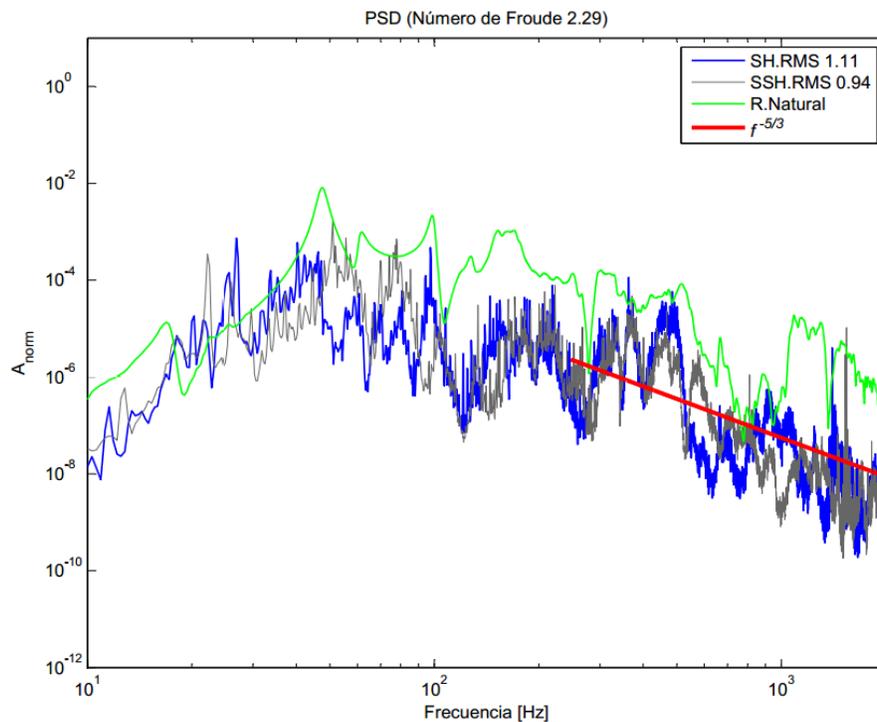


Figura 5-19: PSD $y=0.4$, Número de Froude 2.29. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

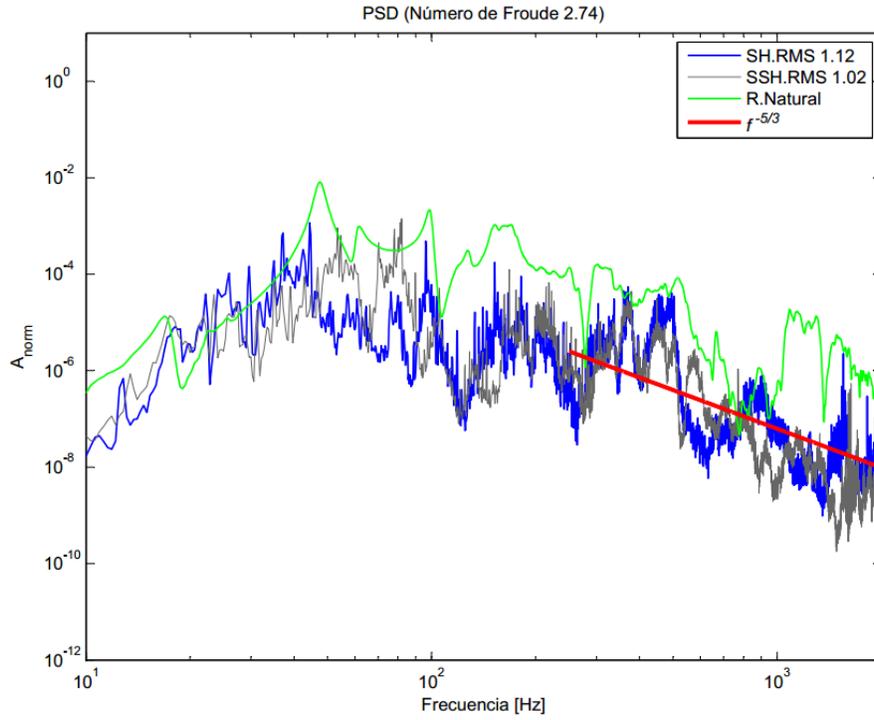


Figura 5-20: PSD $y=0.4$, Número de Froude 2.74. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

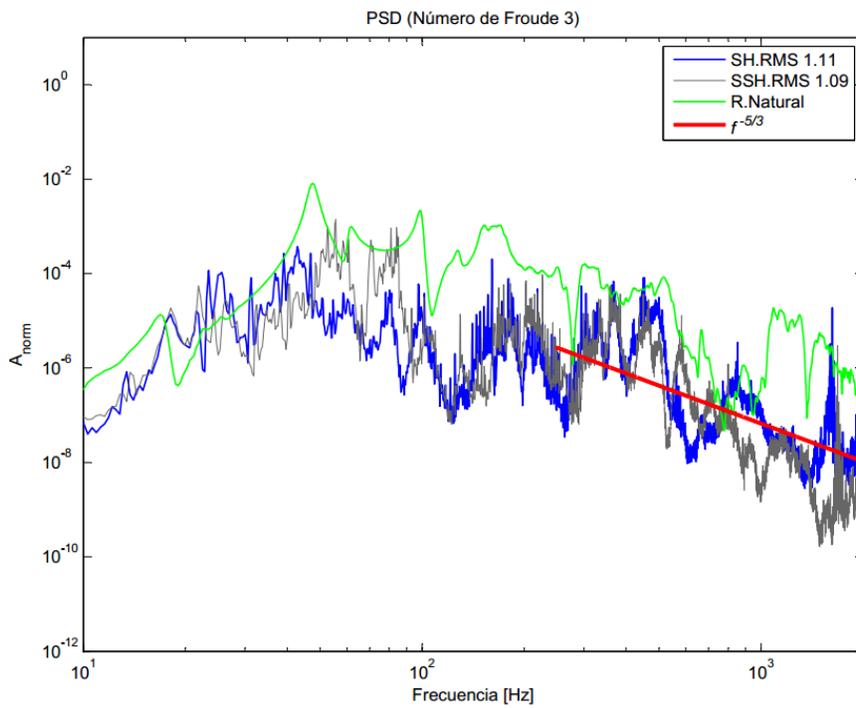


Figura 5-21: PSD $y=0.4$, Número de Froude 3. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

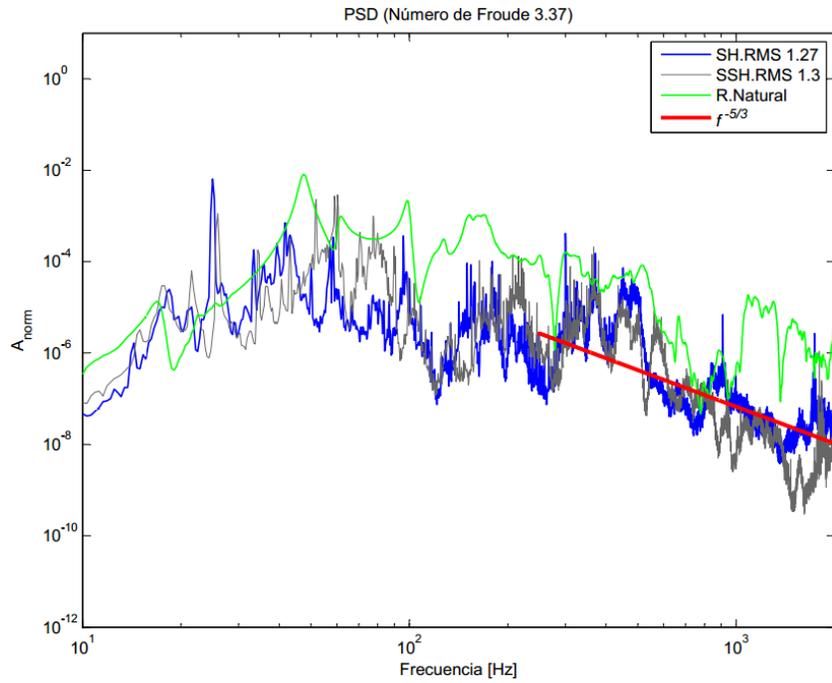


Figura 5-22: PSD $y=0.4$, Número de Froude 3.37. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

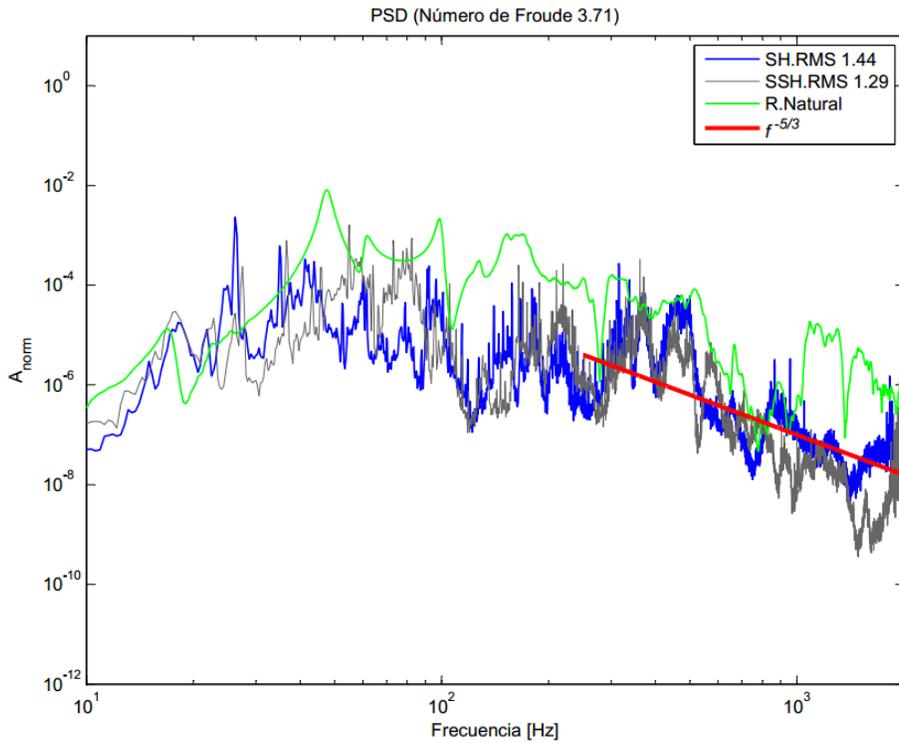


Figura 5-23: PSD $y=0.4$, Número de Froude 3.71. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

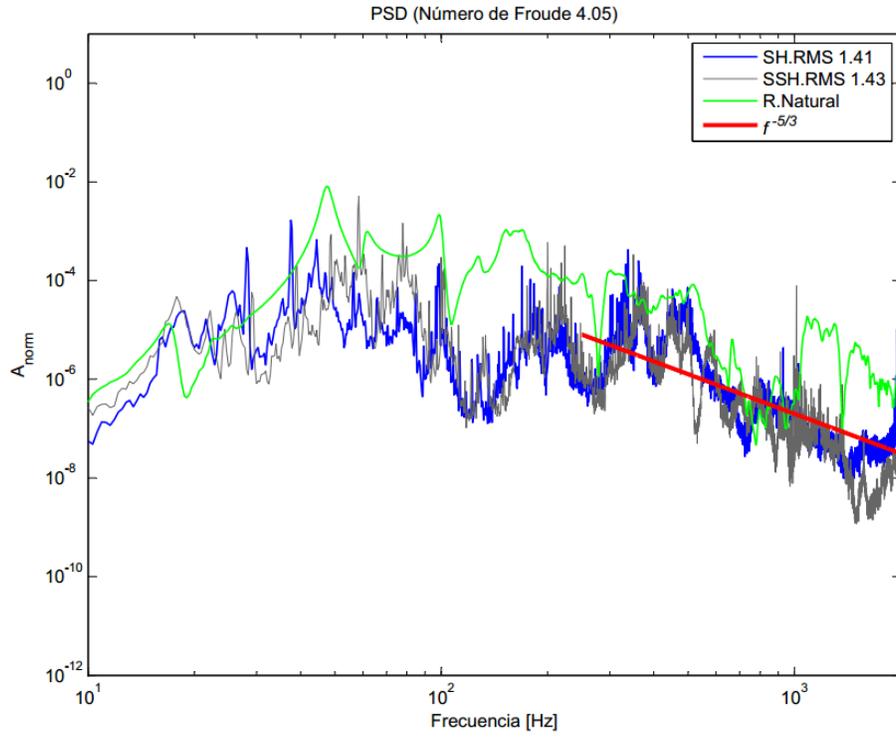


Figura 5-24: PSD $y=0.4$, Número de Froude 4.05. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

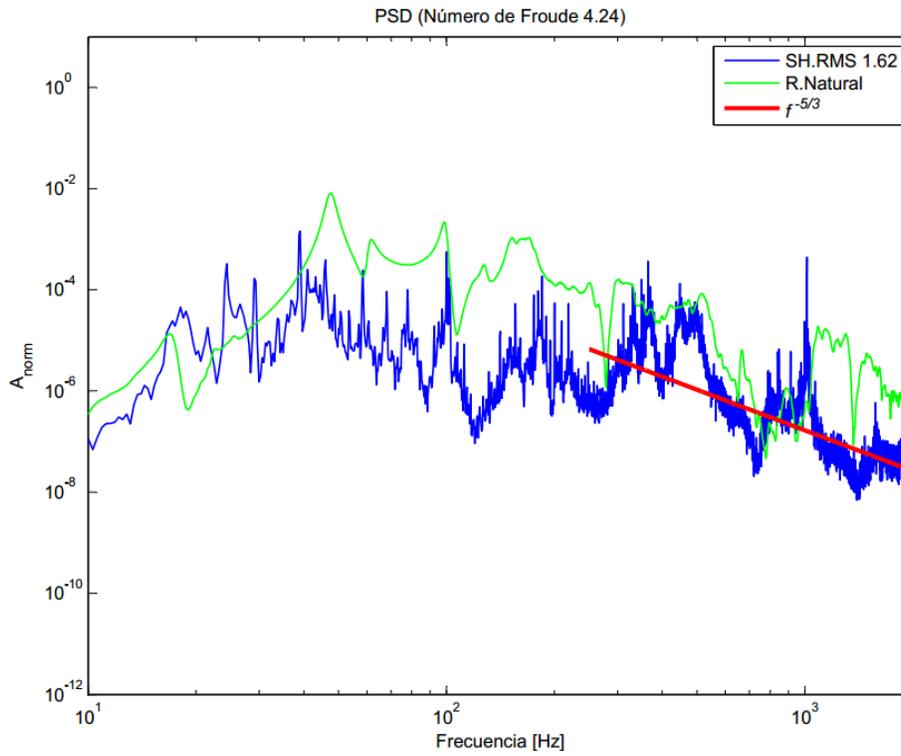


Figura 5-25: PSD $y=0.4$, Número de Froude 4.24. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

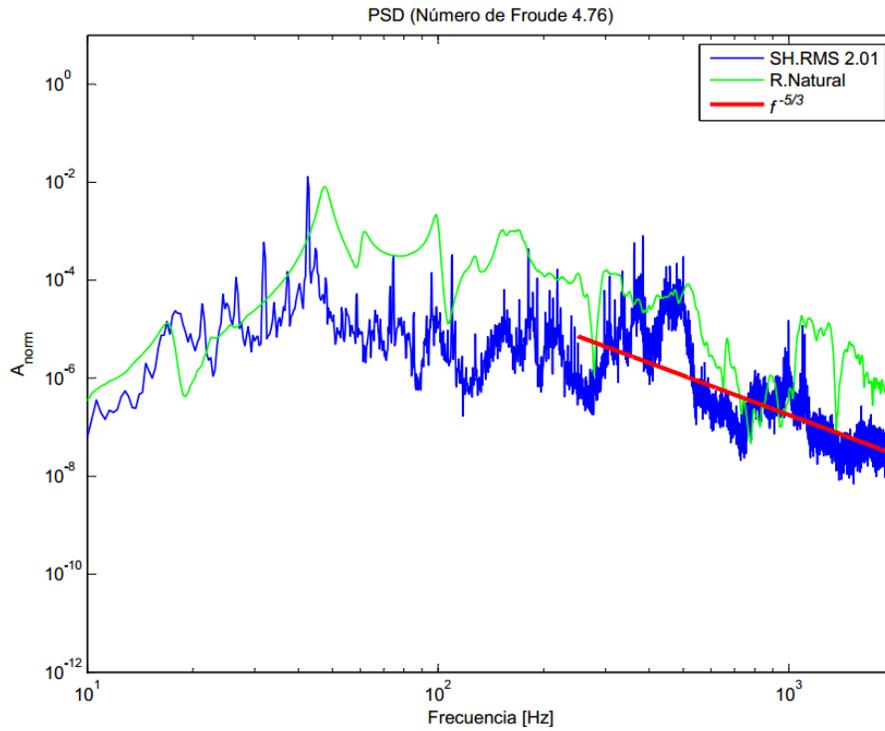


Figura 5-26: PSD $y=0.4$, Número de Froude 4.76. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

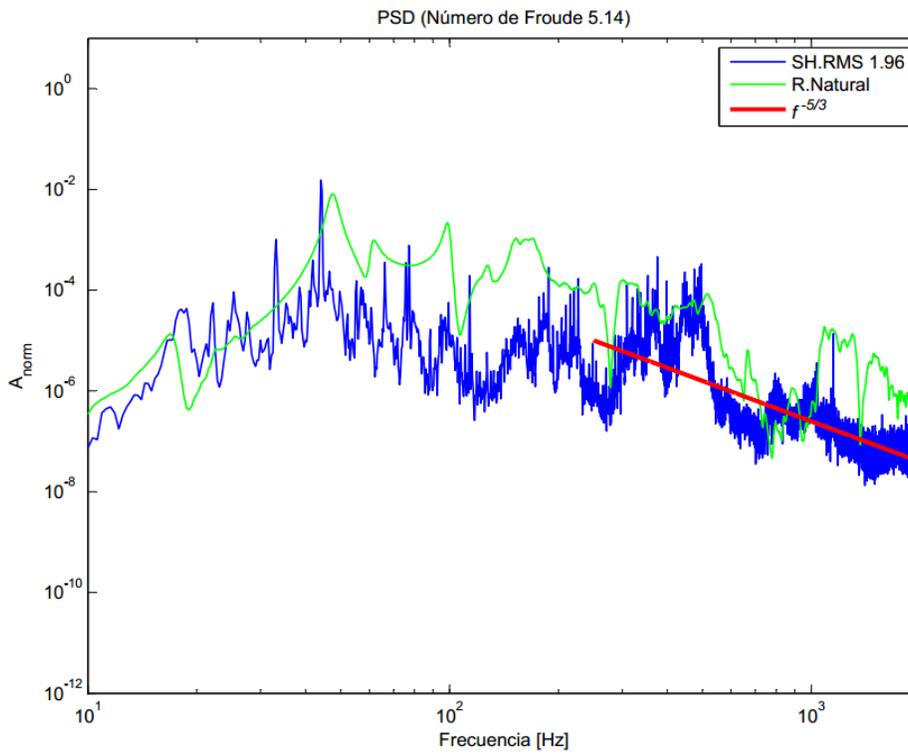


Figura 5-27: PSD $y=0.4$, Número de Froude 5.14. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

Se busca encontrar aspectos característicos del salto hidráulico en las gráficas, i.e. frecuencias de excitación que sean atribuibles y distinguan este fenómeno o si se excitan frecuencias naturales de la estructura, las cuales se encuentran a frecuencias bajo los 150 Hz.

En las figuras 5-19 a 5-24 tanto la gráfica azul como la gris poseen un peak sobre los 1000Hz. Por otra parte, sobre los 300Hz ambas gráficas tienen un comportamiento similar. La gráfica gris, al igual que la azul, decae a altas frecuencias, pero este decaimiento no se ajusta a la ley $f^{-5/3}$. Junto a ello, entre 300 y 500Hz los espectros difieren en amplitud, teniéndose peaks más altos en el ensayo con salto hidráulico.

Las principales diferencias entre las gráficas están entre los 10 y 200 Hz. En este intervalo, los ensayos en donde se experimenta el salto hidráulico presentan vibraciones de gran amplitud bajo los 50 Hz, mientras que en los que no está presente se tienen vibraciones importantes entre los 40 y 80Hz. Por otra parte, en todos los ensayos la gráfica del salto presenta un peak en frecuencias cercanas a los 100Hz, la que se corresponde con uno de los modos de la estructura.

Al observar en detalle los espectros de las mediciones realizadas, se observan peaks a 2.3X de la frecuencia de rotación del motor en todas las mediciones. Estos peaks característicos no están presente en la gráfica gris y tampoco en los valores registrados en el funcionamiento de la bomba centrífuga. Entre los números de Froude 2.21 y 2.74 se tienen peaks a 2.3X y 3.5X. Para el intervalo entre 3 y 4.1 se tienen peaks a frecuencias 1.7X. A partir del número de Froude 3 se visualizan peaks a 21X. Todas estas frecuencias mencionadas se encuentran entre los enlistados para la bomba centrífuga (sección 5.3). Esto indica que, para este ensayo y el anterior, la impulsión del flujo juega un rol importante en las vibraciones producidas en la tubería. En los dos últimos ensayos solo se visualizan peaks a 2.3X, en una zona cercana al primer modo de la tubería (40-50Hz). En la Figura 5-28 se muestra el espectro a $F=5.14$ en donde se ve el peak mencionado.

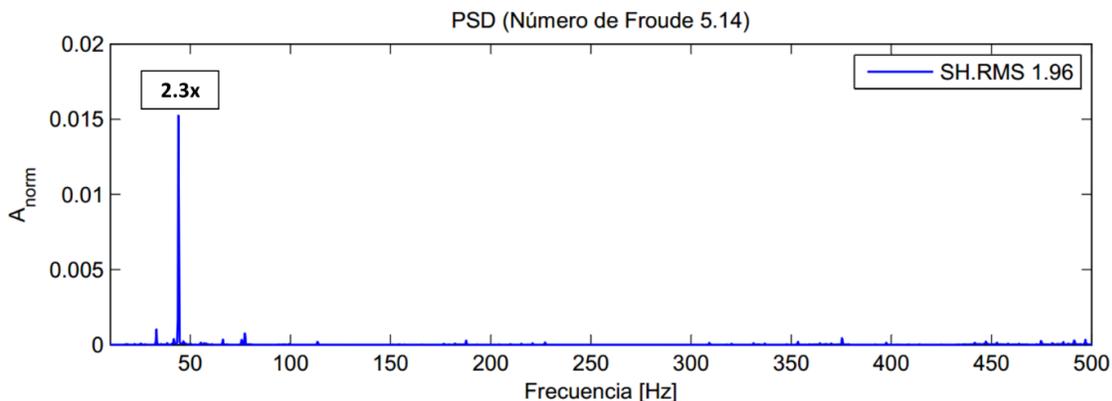


Figura 5-28: Espectro $F=5.14$

5.3.1.3 $y=0.5$

Utilizando esta razón de llenado se realizaron ensayos con números de Froude desde 1.51 a 4.44, teniendo en consideración que la condición de choking se tiene para un número de Froude igual a 2. En la Figura 5-29 se muestra la evolución del salto hidráulico al interior de la tubería desde antes de iniciado el choking hasta la formación de un régimen turbulento.

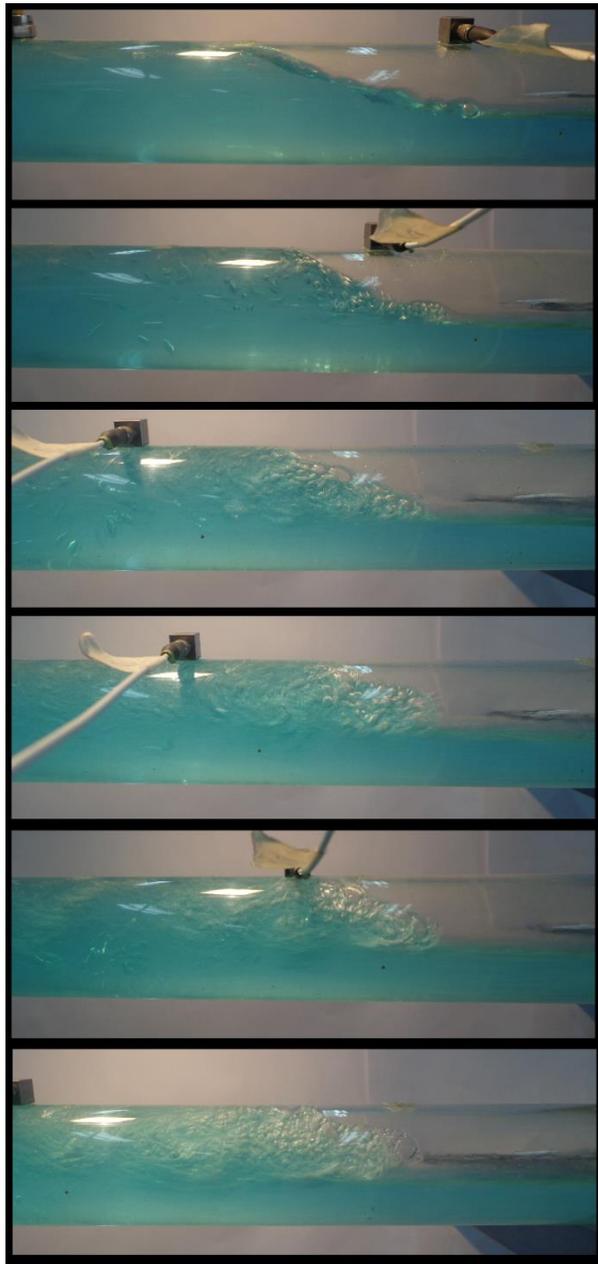


Figura 5-29: Salto hidráulico $y=0.5$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 1.92, 2.47, 2.93, 3.24, 3.79, 4.44.

Para esta razón de llenado solo se midió la PSD de la tubería experimentando el salto hidráulico (SH). Esto debido a que producto de la caída de presión que representa el tramo de descarga se forma el salto hidráulico al realizar los ensayos, aún sin la presencia de la placa perforada.

En las figuras 5-30 a 5-35 se muestran los espectros obtenidos. Se tiene el espectro de la tubería experimentando el salto hidráulico en azul, la respuesta natural de la tubería en verde, y la ley de decaimiento $f^{-5/3}$, característica de flujos turbulentos, en rojo. A medida que el número de Froude aumenta, y el régimen turbulento se desarrolla, el decaimiento de las vibraciones a altas frecuencias se ajusta de mejor forma a la ley mencionada. Por otra parte, en la leyenda de cada gráfica, se muestra el nivel promedio de las vibraciones en la tubería.

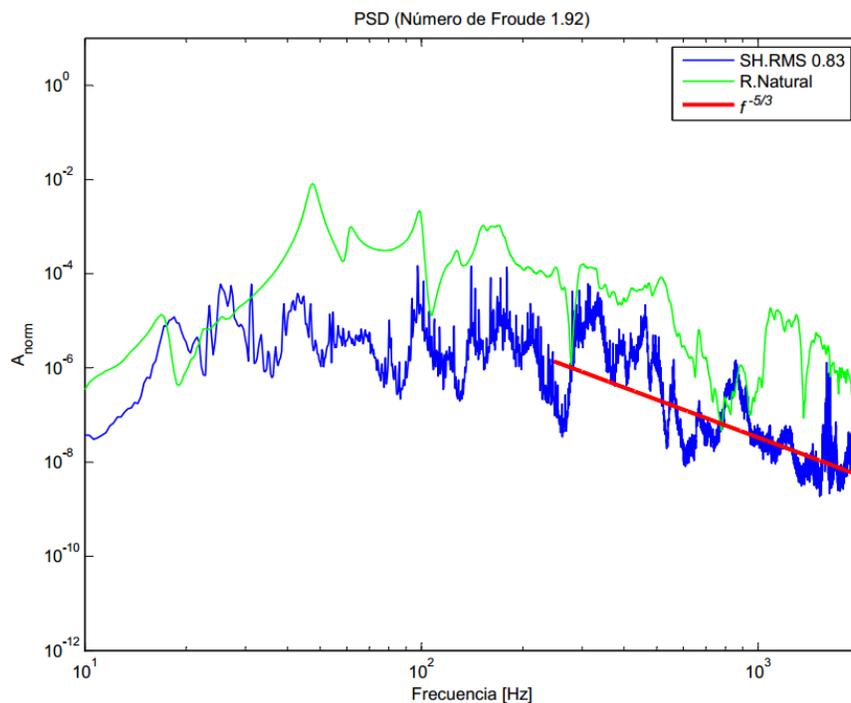


Figura 5-30: PSD $y=0.5$, Número de Froude 1.92. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

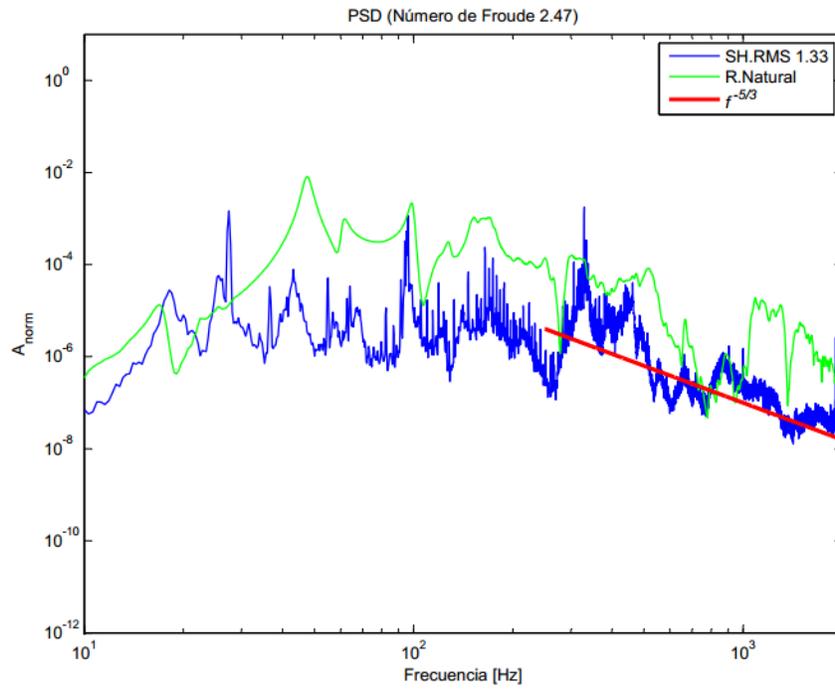


Figura 5-31: PSD $y=0.5$, Número de Froude 2.47. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

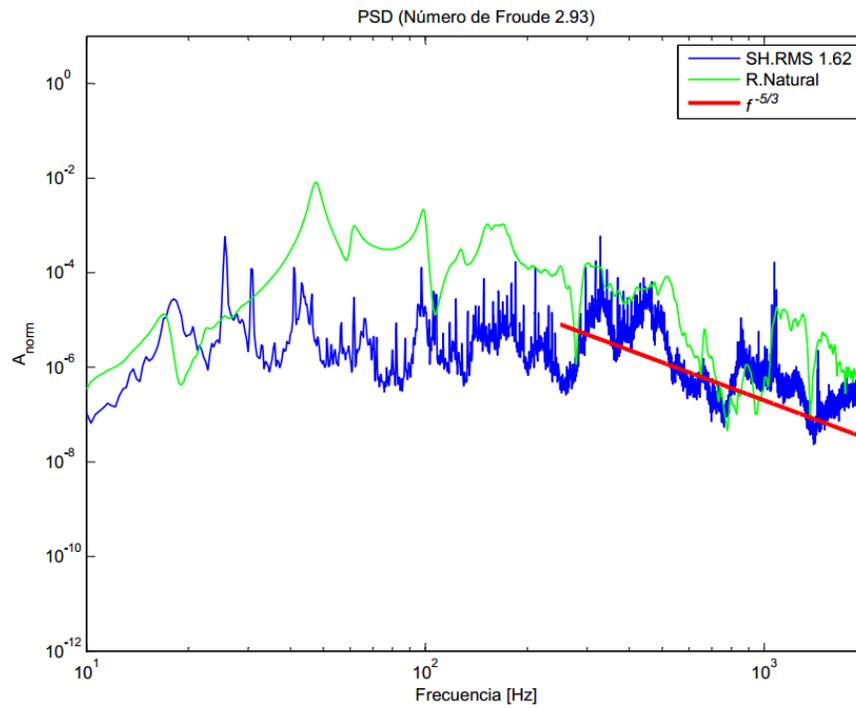


Figura 5-32: PSD $y=0.5$, Número de Froude 2.93. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

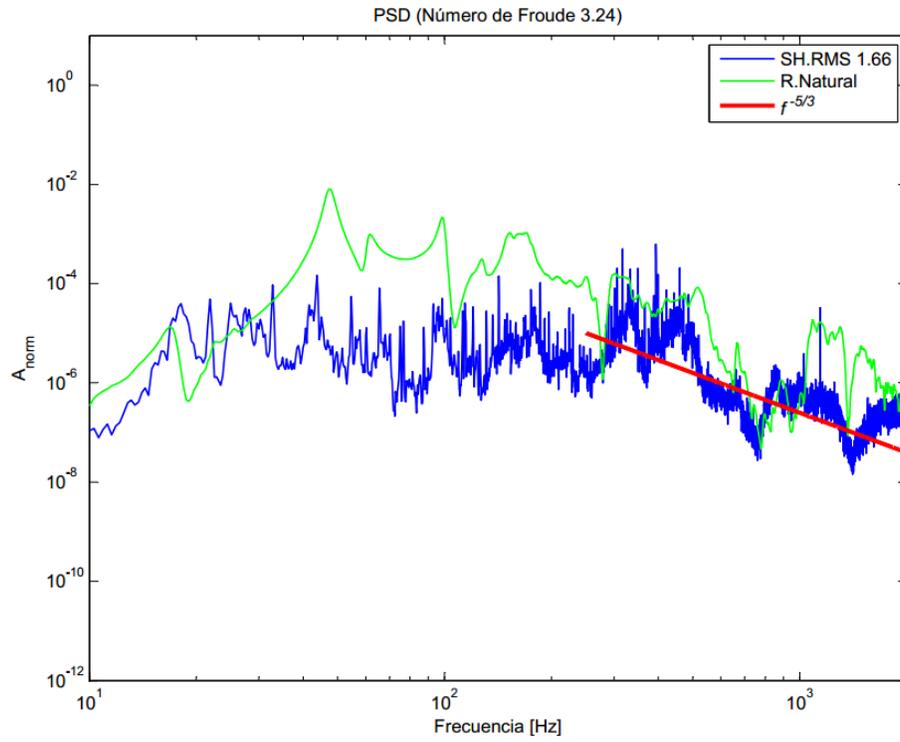


Figura 5-33: PSD $y=0.5$, Número de Froude 3.24. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

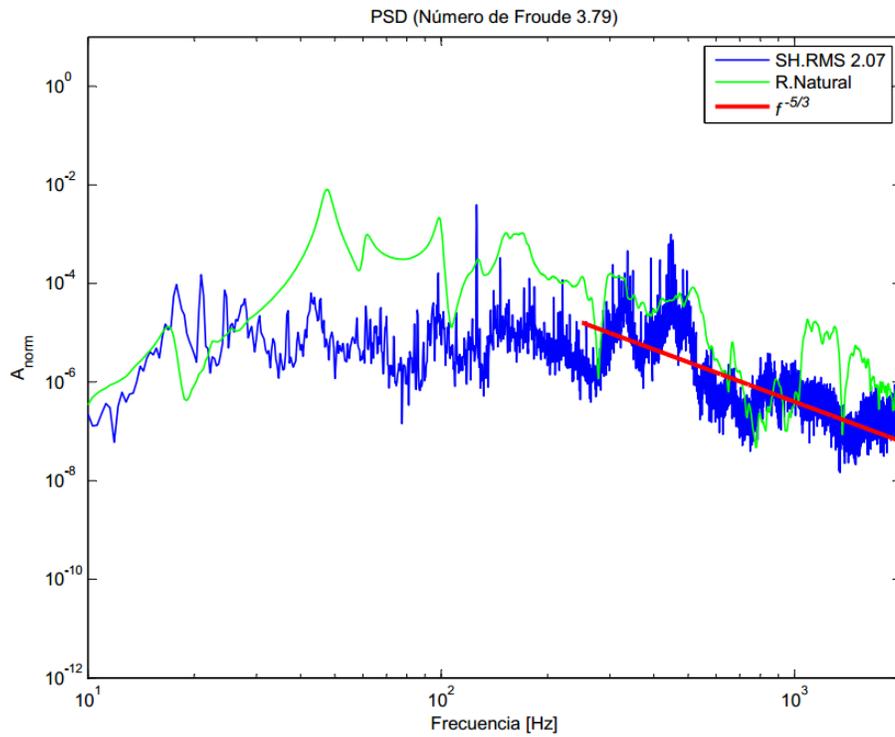


Figura 5-34: PSD $y=0.5$, Número de Froude 3.79. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

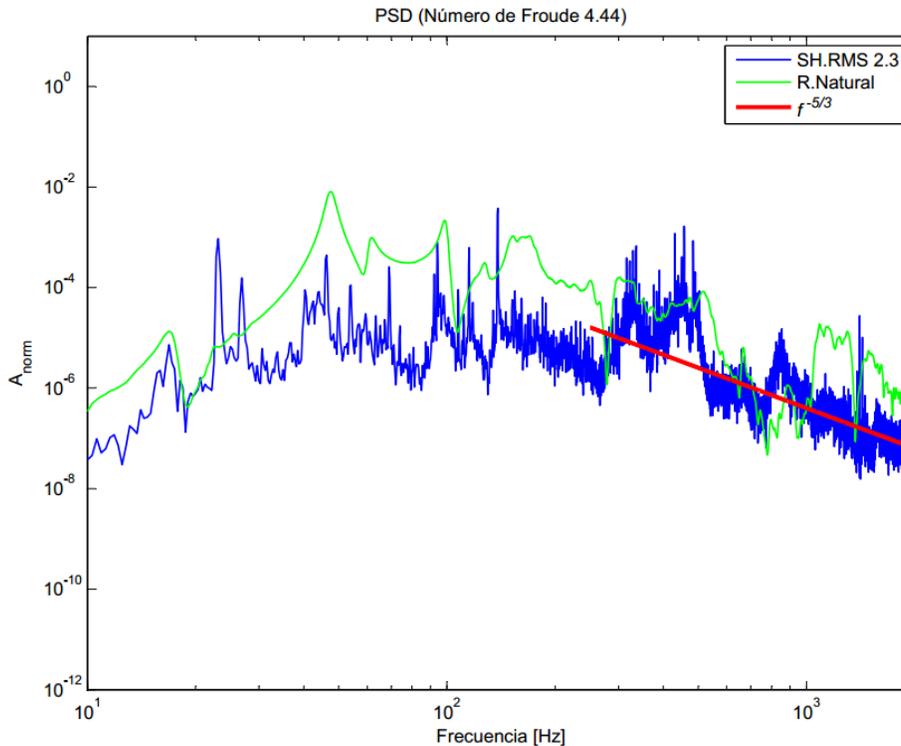


Figura 5-35: PSD $\gamma=0.5$, Número de Froude 4.44. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

Se busca encontrar aspectos característicos del salto hidráulico en las gráficas, i.e. frecuencias de excitación que sean atribuibles y distingan este fenómeno o si se excitan frecuencias naturales de la estructura, las cuales se encuentran a frecuencias bajo los 150 Hz.

Al analizar el espectro e identificar las frecuencias características se puede constatar que todos los ensayos presentan una resonancia en una frecuencia cercana a los 100 Hz. Esta resonancia no se ajusta a ningún múltiplo de la frecuencia de rotación del motor, por lo que se podría atribuir a la excitación de una frecuencia característica de la tubería de pruebas. Por otra parte, en los espectros para números de Froude entre 1.51 y 3.24 se pueden apreciar peaks a múltiplos de la frecuencia de rotación del motor: 1.7X, 2.3X, 3.5X y 21X. En la Figura 5-36 se muestra el espectro para el número de Froude 3.24 en donde se aprecian los peaks mencionados.

Todos los espectros muestran peaks entre los 300 y 500Hz. Entre los números de Froude 2.88 y 3.24 se observa un peak a 18.5X de la frecuencia de rotación del motor. Por otra parte, para los números de Froude que van de 3.1 a 3.48 se observa un peak a 16.6X.

En los espectros para números de Froude entre 3.48 y 4.44, donde existe un régimen turbulento desarrollado, se observa un peak a los 6X. En la Figura 5-37 se muestra el espectro para $F = 3.89$ en donde se aprecia el peak mencionado. La

notoria amplificación de este peak puede estar relacionada con la excitación del cuarto modo de la estructura, que se encuentra en la respuesta natural de referencia a 128Hz.

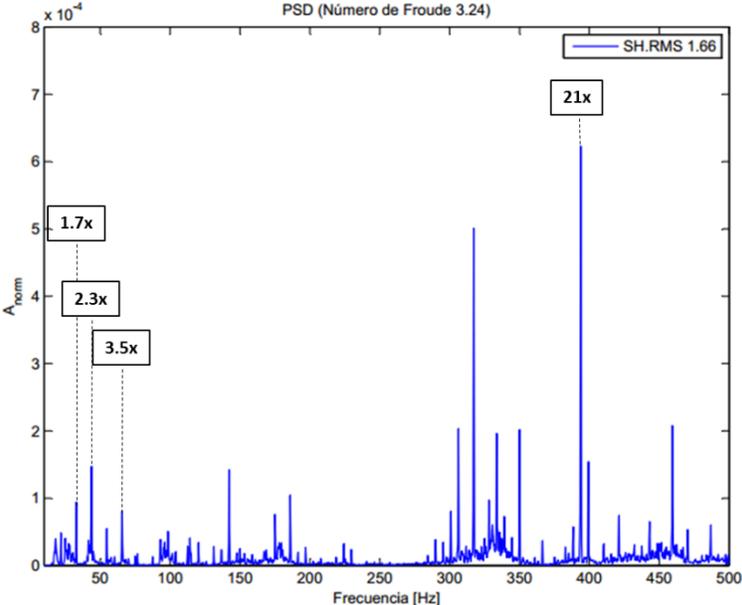


Figura 5-36: Espectro, F=3.24. Peaks a 1.7x, 2.3x, 3.5x y 21x de la frecuencia de rotación del motor.

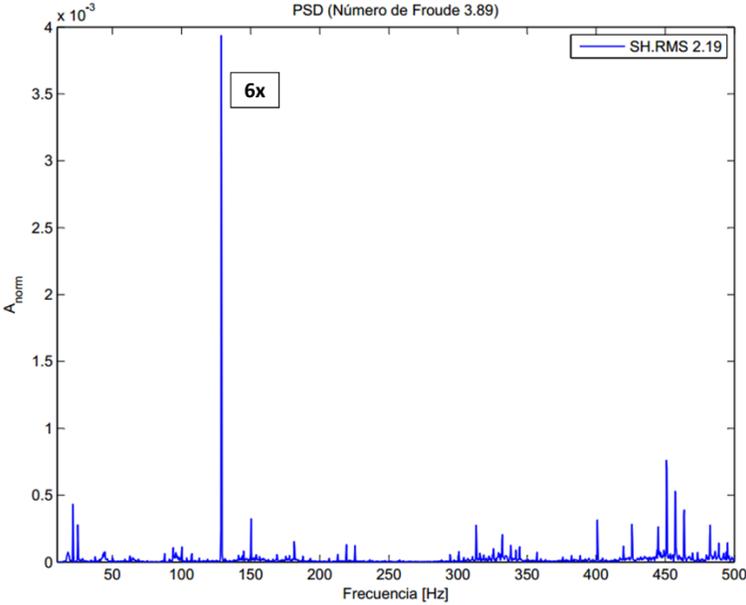


Figura 5-37: Espectro. F=3.89.

5.3.1.4 $y=0.6$

Utilizando esta razón de llenado se realizaron ensayos con números de Froude desde 1.3 a 3.37, teniendo en consideración que la condición de choking se tiene para un número de Froude igual a 1.66. En la Figura 5-38 se muestra la evolución del salto hidráulico al interior de la tubería desde antes de iniciado el choking hasta la formación de un régimen turbulento.

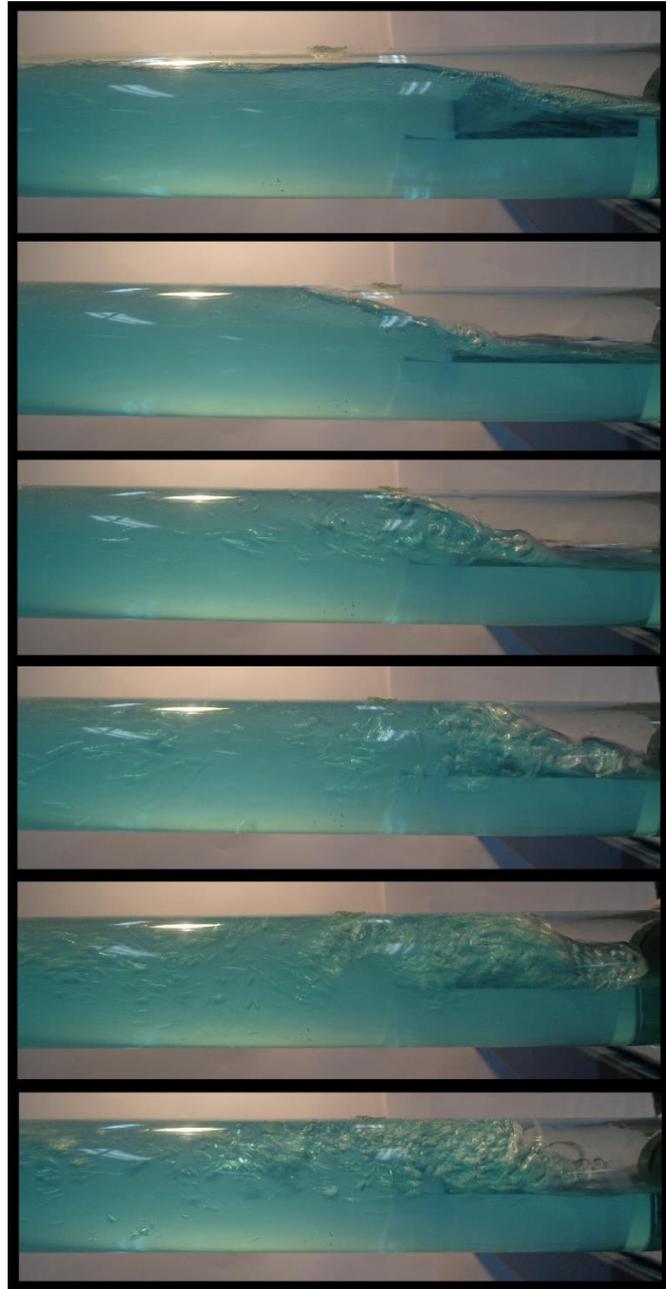


Figura 5-38: Salto hidráulico $y=0.6$. Número de Froude (de arriba hacia abajo): 1.37, 1.62, 2, 2.38, 2.7, 3.37.

Para esta razón de llenado solo se midió la PSD de la tubería experimentando el salto hidráulico (SH). Esto debido a que producto de la caída de presión que representa el tramo de descarga se forma el salto hidráulico al realizar los ensayos, aún sin la presencia de la placa perforada.

En las figuras 5-39 a 5-44 se muestran las gráficas obtenidas. Se tiene el espectro de la tubería experimentando el salto hidráulico en azul, la respuesta natural de la tubería en verde, y la ley de decaimiento $f^{-5/3}$, característica de flujos turbulentos, en rojo. A medida que el número de Froude aumenta, y el régimen turbulento se desarrolla, el decaimiento de las vibraciones a altas frecuencias se ajusta de mejor forma a la ley mencionada. Por otra parte, en la leyenda de cada gráfica, se muestra el nivel promedio de las vibraciones en la tubería.

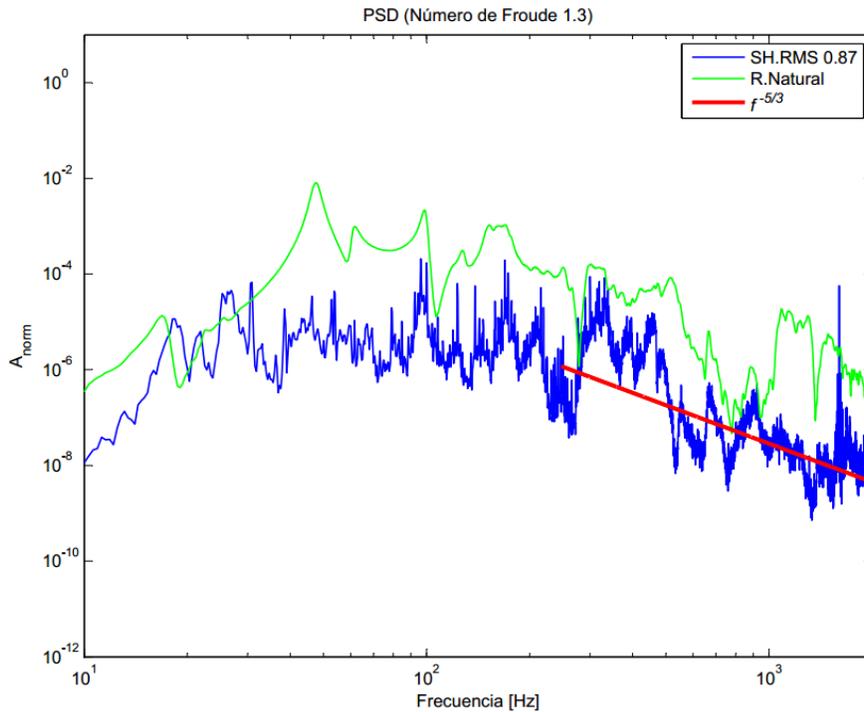


Figura 5-39: PSD $y=0.6$, Número de Froude 1.3. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

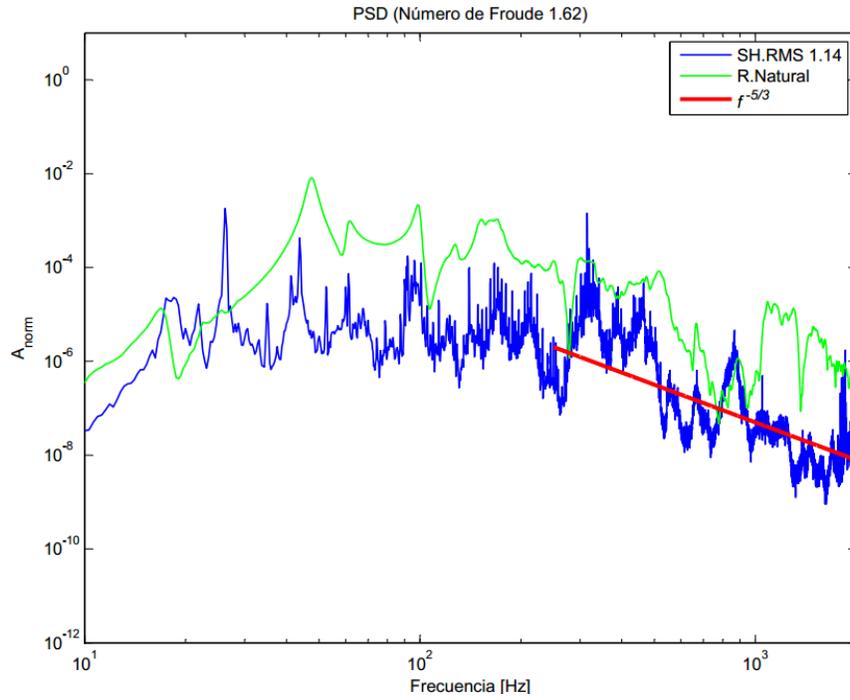


Figura 5-40: PSD $y=0.6$, Número de Froude 1.62. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

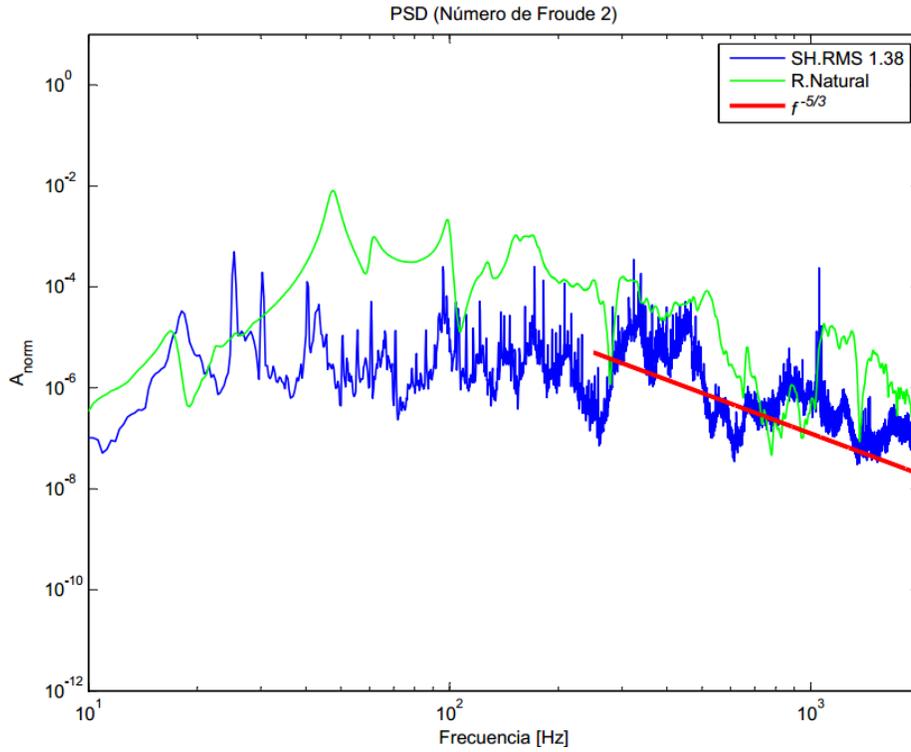


Figura 5-41: PSD $y=0.6$, Número de Froude 2. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

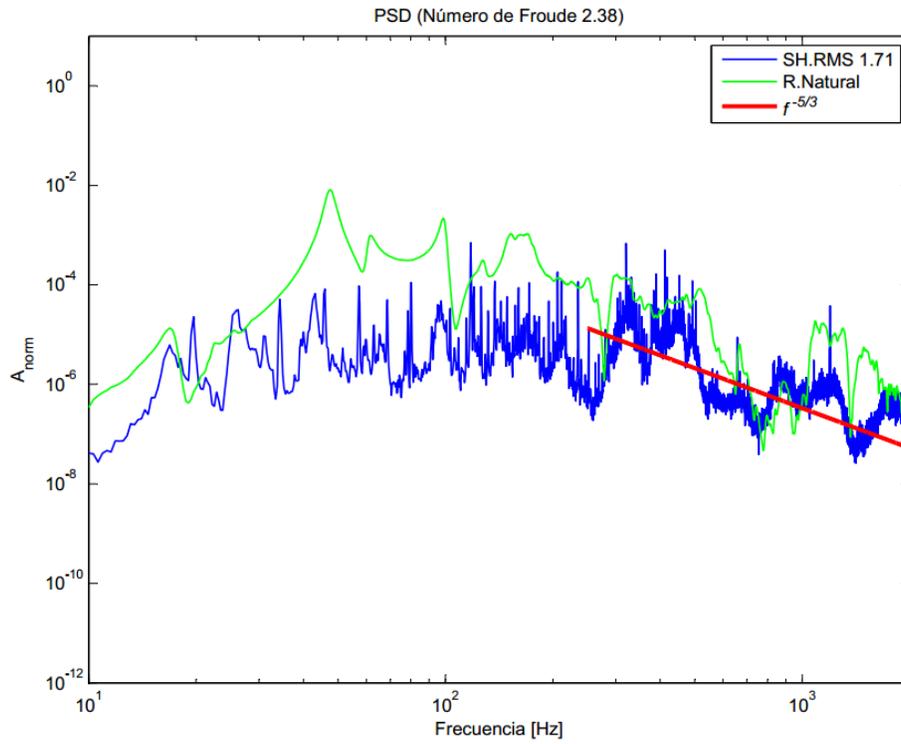


Figura 5-42: PSD $y=0.6$, Número de Froude 2.38. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

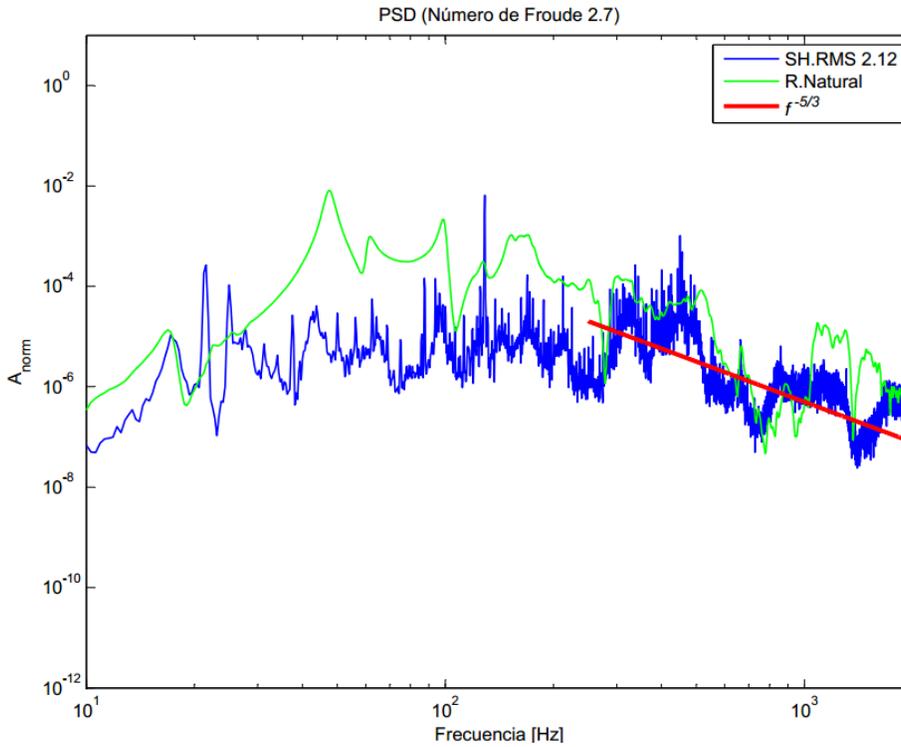


Figura 5-43: PSD $y=0.6$, Número de Froude 2.7. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

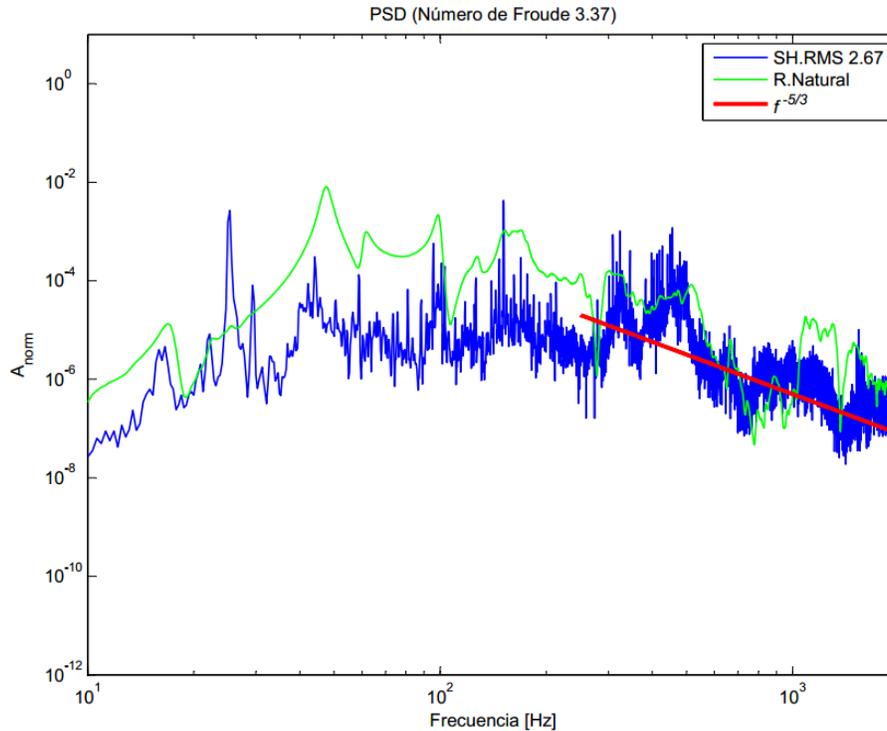


Figura 5-44: PSD $y=0.6$, Número de Froude 3.37. Respuesta natural (verde). Salto hidráulico (azul). $f^{-5/3}$ (rojo).

Se busca encontrar aspectos característicos del salto hidráulico en las gráficas, i.e. frecuencias de excitación que sean atribuibles y distingan este fenómeno o si se excitan frecuencias naturales de la estructura, las cuales se encuentran a frecuencias bajo los 150 Hz.

Como se puede apreciar en las figuras de las PSD, una componente importante de los espectros, para esta razón de llenado y las anteriores, es la zona que va desde los 300 a 500 Hz. En esta zona se presentan diversos peaks, entre las que se encuentra el peak a 21X también observado en el funcionamiento de la bomba.

Al analizar en detalle los espectros de las mediciones realizadas se observan diversos peaks en frecuencias que son múltiplos de la frecuencia de rotación del motor. En la mayoría de los ensayos se observan peaks en los múltiplos 1.7X y 2.3X. Por otra parte, todas las mediciones presentan peaks en frecuencias cercanas a los 100 Hz, que no se correlacionan con múltiplos de dicha frecuencia. Para los ensayos a altas frecuencias de rotación, en donde se desarrolla el régimen turbulento, se puede apreciar un peak característico que se ajusta al múltiplo 6X igual que los ensayos con $y = 0.5$, como se observa en la Figura 5-45. Al igual que para la razón de llenado 0.5, la notoria amplificación de este peak puede estar relacionada con la excitación de uno de los modos de la estructura.

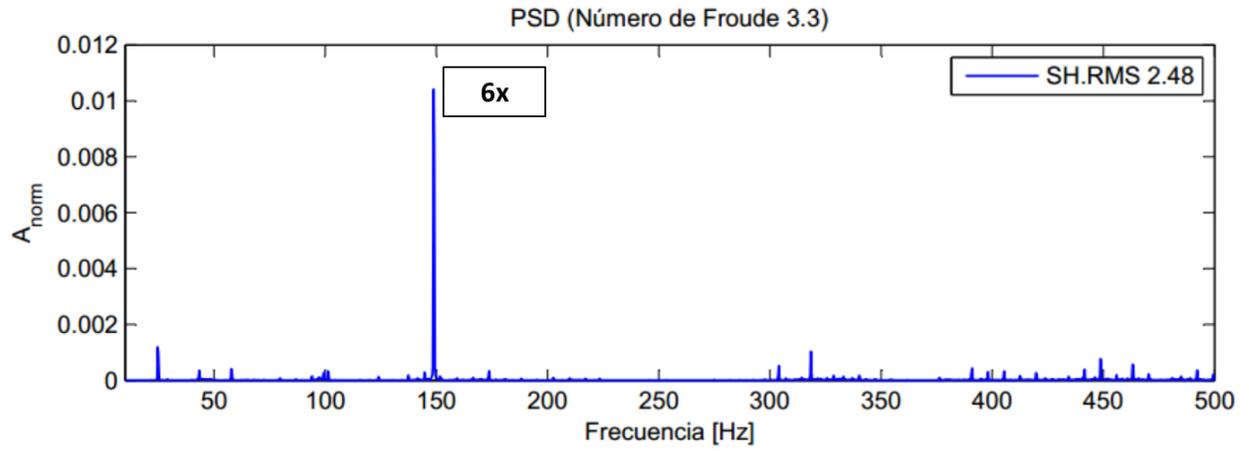


Figura 5-45: Espectro, F=3.3.

5.3.2 Aceleración como función del número de Froude

La Figura 5-46 muestra el valor RMS de la aceleración como función del número de Froude para los ensayos enlistados en el capítulo 4. En la gráfica se muestra la dispersión de los datos según razón de llenado γ . La condición de choking se destaca con una estrella.

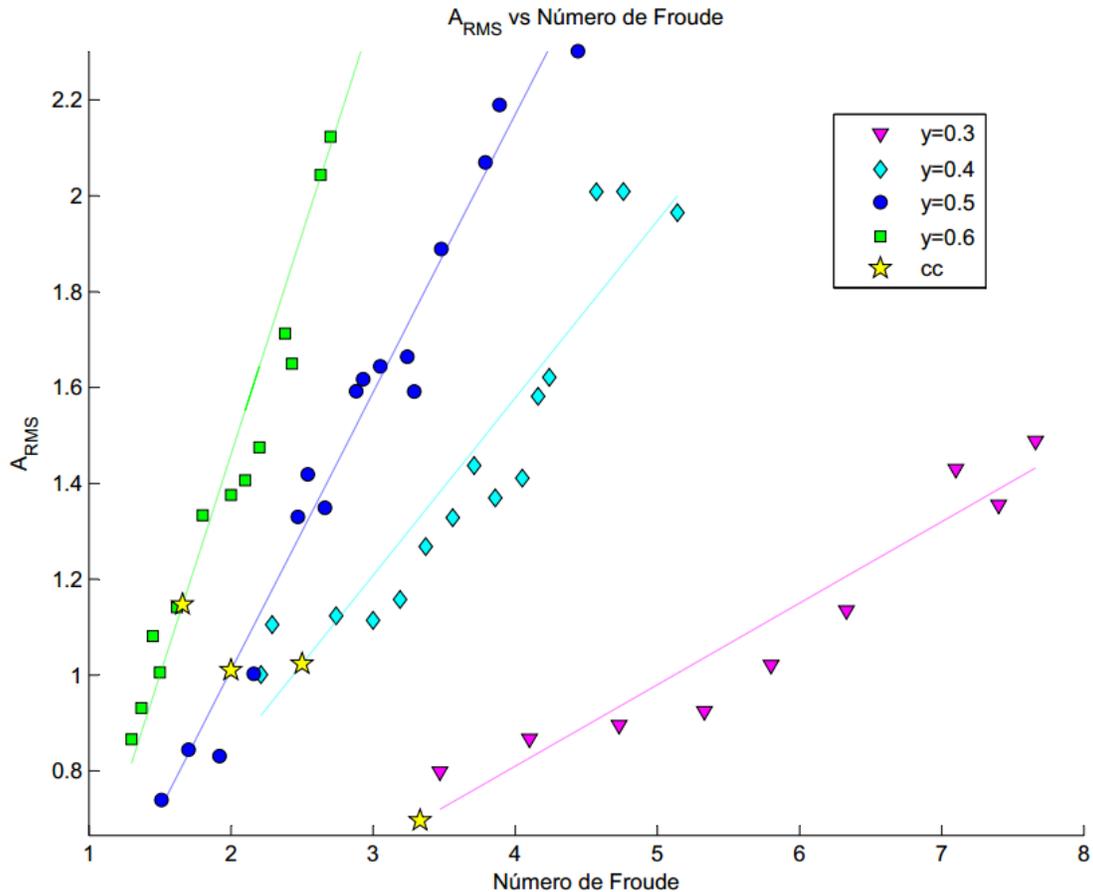


Figura 5-46: Aceleración RMS vs Número de Froude F , cc=condición de choking.

Como se aprecia en la Figura 5-46, para cada razón de llenado γ el nivel de vibraciones aumenta con el número de Froude, exhibiéndose una tendencia lineal (líneas de color) en los valores calculados, con lo que $A_{RMS,\gamma} \sim F$. Dado que para cada ensayo, el número de Froude crece con el caudal $F \sim Q$, se tiene que el nivel de vibraciones escala con la velocidad del flujo $A_{RMS,\gamma} \sim V_f$.

Es sabido que la formación del salto hidráulico conlleva una gran disipación de energía. Luego de alcanzarse la condición de choking y al seguir aumentando el número de Froude la formación de una zona presurizada sujeta a turbulencia comienza a desarrollarse al interior de la tubería. La dependencia lineal de las vibraciones con respecto al número de Froude puede deberse principalmente a los

cambios que suceden tanto en la forma del salto hidráulico (largo de aireación y recirculación) como en el aumento de la zona presurizada.

Para las razones de llenado 0.5 y 0.6 se registraron valores de aceleración antes de la condición de choking. En dicha zona solo se percibe un aumento en el nivel de vibraciones según la tendencia.

Otro aspecto importante de la Figura 5-46 es que la pendiente de las líneas de tendencia incrementa con la razón de llenado. Para conocer más sobre esta característica, en la Figura 5-47, se muestra la comparación entre el nivel de vibraciones de los ensayos con y sin salto, para las razones de llenado 0.3 y 0.4.

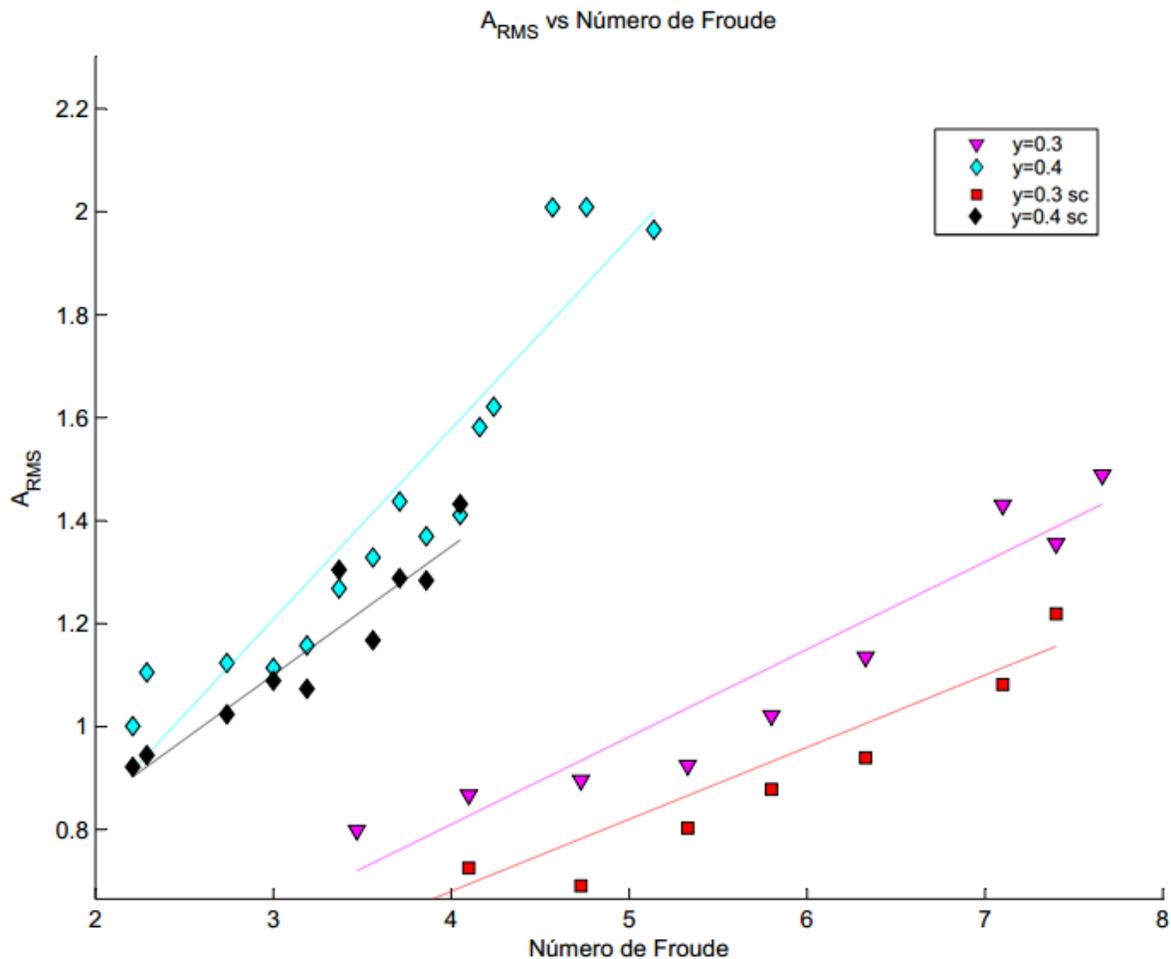


Figura 5-47: Aceleración RMS vs Número de Froude F . Comparación ensayos con y sin salto hidráulico (sc).

Como se aprecia en la Figura 5-47, los datos de los ensayos sin salto hidráulico muestran una tendencia similar a los de los ensayos con salto hidráulico. Los ensayos sin salto hidráulico exhiben una tendencia lineal con respecto al número de Froude. Por otra parte, también se observa un incremento en la pendiente entre las razones 0.3 y 0.4. Así, se observa que el efecto del salto hidráulico es el de

“amplificar” el nivel de vibraciones, mientras que la tendencia y pendiente de los datos pueden estar relacionados con la impulsión de agua en la instalación.

5.3.3 Influencia de la distancia entre soportes en el nivel de vibraciones

Se llevó a cabo un ensayo disminuyendo la distancia entre los soportes de manera que el salto hidráulico continuara sucediendo entre estos. La distancia se escogió en 70 cm. Utilizando la razón de llenado $y = 0.5$ se midió el nivel de vibraciones en el rango de números de Froude expuesto en el capítulo 4. En la Figura 5-48 se muestra la gráfica obtenida del valor RMS de la aceleración como función del número de Froude para las distancias consideradas.

De la gráfica se aprecia que, si bien la A_{RMS} aumenta con el número de Froude, la magnitud de la vibración es menor para el ensayo a 70 cm. Al acortar la distancia entre los soportes se tiene un tramo libre más rígido, por lo que es esperado que el nivel de vibraciones disminuya. Por otra parte, en este mismo ensayo se aprecian dos puntos que se alejan de la tendencia de los datos, registrándose un nivel de vibraciones mucho mayor. Dado que no se observaron cambios en el flujo, este comportamiento puede asociarse a una vibración cercana a una de las frecuencias naturales de la estructura, lo que puede haber producido un efecto de resonancia.

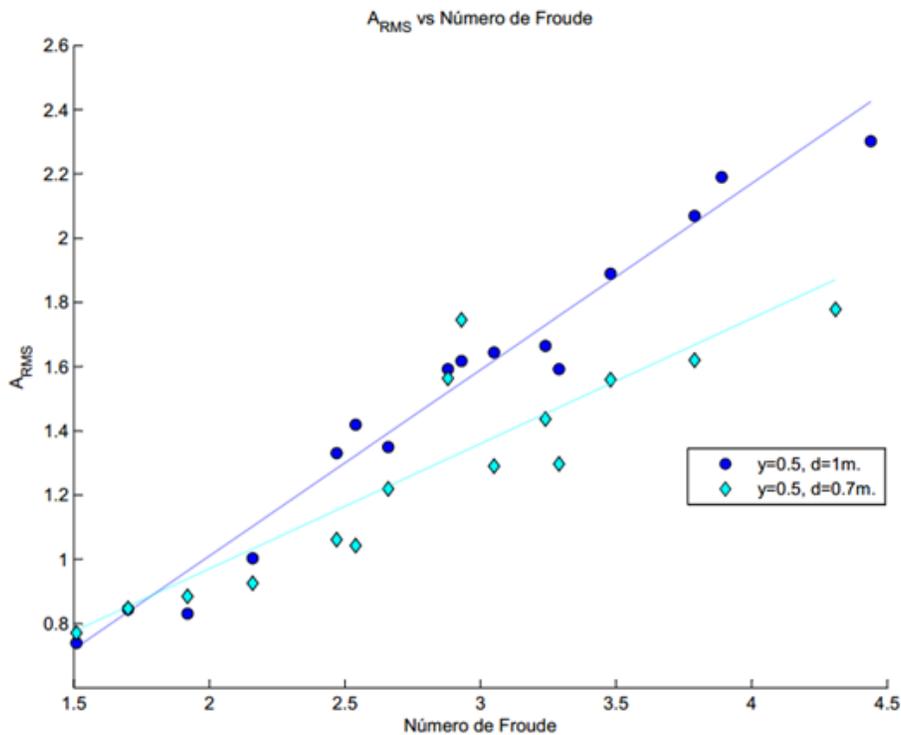


Figura 5-48: Aceleración RMS vs Número de Froude F.

6 Conclusiones

En este trabajo de título se presentaron los resultados de una investigación experimental para caracterizar las vibraciones producidas por saltos hidráulicos en una tubería circular de diámetro $1 \frac{3}{4}$ de pulgada. Los experimentos se realizaron en una instalación que permitió forzar la aparición del salto hidráulico para distintas razones de llenado, en un rango de números de Froude, con la finalidad de: determinar la relación entre las vibraciones producidas por los saltos hidráulicos y las frecuencias naturales de la tubería con agua, estudiar el espectro de las vibraciones a través de la gráfica del PSD para identificar aspectos característicos del salto hidráulico, estudiar la dependencia del nivel de vibraciones en la tubería con respecto al número de Froude y ver la influencia de la distancia entre los soportes de la tubería en su respuesta dinámica.

6.1 Análisis Espectral

Se midieron las vibraciones en la tubería, para las cuatro razones de llenado disponibles, en rangos del número de Froude. Las mediciones se realizaron forzando la aparición del salto hidráulico en la tubería, dejando un tramo de 1 metro entre soportes. Paralelamente, para las razones de llenado $y=0.3$ e $y=0.4$, se realizaron ensayos sin forzar la aparición del salto. De los ensayos realizados se obtuvieron gráficas de la densidad de potencia espectral PSD. Considerando que en los experimentos con salto hidráulico se utilizó una cantidad importante de agua se escogió como referencia para la respuesta natural de la tubería el resultado del test de impacto con la tubería semi-llena.

Se comprobó que en los ensayos los espectros se ajustan, para todas las razones de llenado, a la ley de decaimiento $f^{-5/3}$ característica de flujos turbulentos. Dicho ajuste se observa entre los 500 y 2000 Hz para los ensayos en donde se forzó la aparición del salto hidráulico. Por otra parte, los espectros se ajustan de mejor forma a dicha ley al aumentar el número de Froude. Al observar las imágenes de la evolución del salto hidráulico según razón de llenado se aprecia la formación de un régimen turbulento en la tubería al aumentar el número de Froude, lo que guarda estrecha relación con el mejoramiento del ajuste según la ley de decaimiento para flujo turbulento interno.

Para las razones de llenado 0.3 y 0.4 se registraron vibraciones sin forzar la aparición del SH. Se obtuvo un mayor nivel de vibración, representado por el valor RMS de la aceleración, en los ensayos con SH.

Se buscó encontrar aspectos característicos del salto hidráulico en las gráficas, i.e. frecuencias de excitación que sean atribuibles y distingan este fenómeno o si se excitan frecuencias naturales de la estructura.

Al comparar los espectros de las mediciones con y sin salto se encontraron diversas diferencias en amplitud y frecuencia. En el rango de frecuencia entre 300 y 500 Hz, los ensayos con SH presentan peaks de mayor amplitud que difieren en frecuencia a los observados en las gráficas sin SH. Bajo los 300 Hz ambos revelaron la presencia de peaks presentes en los espectros de la bomba centrífuga en funcionamiento. Se observaron peaks, en ambos espectros, en los múltiplos de la frecuencia de rotación del motor 1.7X y 3.5X. Por otra parte, los espectros obtenidos de las mediciones sin SH no se ajustaron a la ley de decaimiento $f^{-5/3}$. Con esto se comprobó la influencia de la aparición del salto hidráulico en la respuesta dinámica de la tubería de pruebas.

Al analizar en detalle el espectro de los ensayos con SH se apreciaron distintos peaks que también pudieron ser observados en el espectro de la bomba centrífuga en funcionamiento. Esto puede indicar que la impulsión del flujo juega un rol importante en la respuesta dinámica del sistema. En las diferentes razones de llenado, y en ciertos intervalos de los números de Froude considerados, se encontraron peaks en múltiplos de la frecuencia de rotación del motor: 1.7X, 3.5X, 10.5X y 21.1X. Es importante señalar que en todos los ensayos realizados se tiene la presencia de peaks a frecuencias que se ajustan al múltiplo 2.3X de la frecuencia de rotación del motor y que no se presentan en el espectro de la bomba centrífuga en funcionamiento. En los ensayos con razones de llenado 0.5 y 0.6, a altos números de Froude, se tuvo la presencia de un peak característico de gran amplitud y que se ajustó al múltiplo de la frecuencia del motor 6X. Se presume que ésta es la frecuencia característica de la bomba.

En la mayoría de los ensayos realizados para las razones de llenado consideradas se tiene la presencia de peaks alrededor de los 100 Hz que no se ajustan a múltiplos de la frecuencia del motor, ni tampoco se visualizan en las gráficas disponibles de los ensayos sin salto hidráulico. Esta componente del espectro del SH cobra importancia ya que se tiene un modo en esa zona.

En las distintas razones de llenado se verificó la excitación de modos normales de la estructura. Esto explica la amplificación de ciertos peaks visualizados en los espectros para las razones de llenado 0.4, 0.5 y 0.6.

6.2 Nivel de vibraciones y distancia entre soportes

Se estudió la dependencia del nivel de las vibraciones, representado por el valor cuadrático medio de la aceleración, con respecto al número de Froude. Se obtuvo que, para cada razón de llenado y , el nivel de vibraciones aumenta de forma lineal con respecto al número de Froude, con lo que $A_{RMS,y} \sim V_f$. Al aumentar el número de Froude la forma del salto hidráulico comienza a evolucionar, cambiando los largos de aireación y recirculación, y produciendo la formación de una zona de flujo presurizado sujeto a turbulencia.

Se obtiene entonces un resultado distinto al conocido para flujo presurizado, en donde se tiene que, cuando se somete este a turbulencia, las vibraciones son proporcionales a la presión en la tubería, con lo que $A_{RMS,y} \sim V_f^2$.

Por otra parte se obtiene un incremento en la pendiente de las líneas de tendencia al aumentar la razón de llenado, registrándose un cambio notorio en la transición de 0.3 a 0.4. Al comparar los datos obtenidos en ensayos con y sin salto para estas razones de llenado, se observó que el efecto del salto hidráulico es el de “amplificar” las vibraciones, mientras que tanto la tendencia como los incrementos de pendiente pueden ser atribuidos a la impulsión del fluido.

Se estudió el efecto de reducir la distancia entre los soportes del tramo de estudio de la tubería de pruebas. Se registró, para una misma razón de llenado, un menor nivel de vibraciones en la tubería de pruebas. Este resultado puede deberse al aumento en la rigidez de la tubería producto de la disminución de la distancia entre los soportes.

6.3 Comentarios Finales

Esta investigación permitió conocer características importantes de las vibraciones producidas por saltos hidráulicos en una tubería. Se destaca el ajuste de los espectros obtenidos en los ensayos con salto hidráulico a la ley de decaimiento según $f^{-5/3}$, característica de flujos turbulentos, con lo que se evidencia la similitud del fenómeno con las vibraciones producidas por turbulencia en tuberías presurizadas.

Por otra parte, la variación lineal del nivel de vibraciones (valor RMS de la aceleración) con respecto al número de Froude permite concluir que la aceleración promedio de las paredes de la tubería es proporcional a la velocidad del flujo $A_{RMS,y} \sim V_f$.

Con los resultados experimentales se concluye que el salto hidráulico juega el rol de “amplificar” las vibraciones en la tubería ya que las vibraciones en los ensayos sin salto muestran un comportamiento similar en cuanto a linealidad y tendencia.

Finalmente, se destaca la disminución del nivel promedio de las vibraciones al estudiar el efecto de reducir la distancia entre soportes, lo que da cuenta de un aumento en la rigidez de la tubería.

7 Bibliografía

- [1] H. Stahl and W. Hager, “Hydraulic jump in circular pipes,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 3, pp. 368–373, 1999.
- [2] W. H. Hager, *Wastewater Hydraulics*, Second Edi. Springer, 2010.
- [3] V. Meruane, *Vibraciones Mecánicas Apuntes para el curso ME4701*. .
- [4] V. Meruane, *Dinámica Estructural Apuntes para el curso ME706*. .
- [5] W. H. Press, “Power Spectrum Estimation Using the FFT,” in *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1992.
- [6] WaveMetrics, “Power Spectra,” 2013. [Online]. Available: <http://www.wavemetrics.com/products/igorpro/dataanalysis/signalprocessing/powerspectra.htm>. [Accessed: 10-Jun-2013].
- [7] A. S. Thompson, “Experimental Charectarization of Flow Induced Vibration in Turbulent Pipe Flow,” Brigham Young University, 2009.
- [8] A. Technologies, *The Fundamentals of Modal Testing*. pp. 1–56.