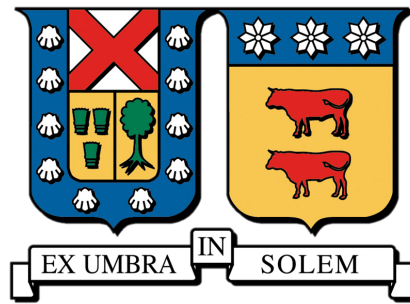


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CAVITACIÓN EN
UN TUBO VENTURI Y VINCULACIÓN ENTRE
EMISIONES ACÚSTICAS Y LAS ESTRUCTURAS DE
LA CAVITACIÓN

ALEJANDRO DE JESÚS MÉNDEZ VÁSQUEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESORA GUÍA: MIRIAM ROTH KLIEM

PROFESOR CORREFERENTE: GUILLERMO GONZALEZ BAQUEDANO

MARZO 2025

Resumen

En este trabajo se analizan las emisiones acústicas que produce la cavitación en un tubo Venturi, para contrastar estos resultados con una estimación de la onda de presión producida por la condensación de estructuras de la cavitación, obtenida a partir de un análisis del nivel de gris. También se observan y analizan las estructuras de la cavitación y los efectos que la cavitación produce sobre el caudal y la presión estática.

Se estudia el fenómeno de la cavitación, sus características principales, la dinámica de las burbujas y los efectos positivos y negativos que produce. Se abordan análisis de emisiones acústicas y los instrumentos de medición requeridos. También se revisan trabajos investigativos similares, con el fin de conocer los distintos procedimientos experimentales posibles.

Con la instrumentación disponible, se realizan mediciones de presión, caudal y temperatura, así como también, adquisición de imágenes de alta velocidad de la cavitación. Se adquiere un sonómetro para realizar las mediciones de emisiones acústicas. Se logra analizar el efecto que la cavitación produce sobre estos parámetros.

También, se realiza un análisis estadístico de imágenes, en donde, primeramente, se obtiene el valor promedio y la desviación estándar del nivel de gris. Con estos resultados, sumados a propiedades físicas del agua y del vapor, y a valores obtenidos de referencias, se estima la onda de presión que producen las estructuras en el proceso de condensación. La estimación de la onda de presión, muestra una similitud con las emisiones acústicas, pero solo cuando no se considera la atenuación.

Palabras claves: cavitación, tubo Venturi, emisiones acústicas, nivel de gris, estructuras de la cavitación

Abstract

This paper analyzes the acoustic emissions produced by cavitation in a Venturi tube in order to compare these results with an estimate of the pressure wave produced by the condensation of cavitation structures, obtained from a gray level analysis. Cavitation structures and the effects that cavitation produces on flow rate and static pressure are also observed and analyzed.

The phenomenon of cavitation is studied, along with its main characteristics, the dynamics of bubbles, and the positive and negative effects it produces. Analysis of acoustic emissions and the required measuring instruments are addressed. Similar research works are also reviewed in order to understand the different possible experimental procedures.

With the available instrumentation, pressure, flow, and temperature measurements are taken, as well as high-speed cavitation imaging. A sound level meter is acquired to take acoustic emission measurements. The effect that cavitation produces on these parameters can be analyzed.

A statistical analysis of the images is also performed, where, first, the average value and the standard deviation of the grey level are obtained. With these results, added to the physical properties of water and steam and to values obtained from references, the pressure wave produced by the structures in the condensation process is estimated. The estimation of the pressure wave shows a similarity with acoustic emissions, but only when attenuation is not considered.

Keywords: cavitation, Venturi tube, acoustic emissions, gray level analysis, cavitation structures

Índice general

Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. Marco teórico	3
3.1. Cavitación	3
3.1.1. Definición	3
3.1.2. Núcleos de cavitación	4
3.1.3. Números adimensionales	5
3.1.4. Estructuras de cavitación	6
3.1.5. Dinámicas de una burbuja	10
3.1.6. Efectos de la cavitación	13
3.1.7. Emisiones acústicas producidas por la cavitación	15
3.2. Señales acústicas	16
3.2.1. Definición	16
3.2.2. Procesamiento digital de señales	17
3.2.3. Análisis espectral de frecuencias	19
4. Estado del arte	21
4.1. Configuración experimental	21
4.2. Caracterización de la cavitación	21
4.2.1. Procedimiento experimental	22
4.3. Análisis de señales acústicas	23

4.3.1.	Nivel de presión sonora	23
4.3.2.	Análisis espectral de frecuencias	25
4.4.	Análisis estadístico de imágenes	26
4.5.	Instrumentos de medición acústica	28
4.5.1.	Hidrófono	28
4.5.2.	Sensor de emisión acústica	29
4.5.3.	Micrófono	29
5.	Metodología	31
5.1.	Equipamiento del banco de ensayo	31
5.1.1.	Sensores	32
5.1.2.	Tubo Venturi	33
5.1.3.	Sistema de control y adquisición de datos	33
5.1.4.	Instrumento de medición acústica	34
5.2.	Procedimiento experimental	35
5.3.	Determinación de parámetros de cavitación	36
5.4.	Medición de la presión sonora	36
5.5.	Obtención de imágenes de alta velocidad	37
5.6.	Análisis estadístico de imágenes	38
5.6.1.	Determinación del nivel de gris	38
5.6.2.	Amplitud de la onda de presión	39
5.6.3.	Atenuación de la onda de presión	40
5.6.4.	Fracción de vapor y propiedades del fluido	40
5.6.5.	Expresión para la onda de presión	42
6.	Resultados	43
6.1.	Caracterización de la cavitación	43
6.2.	Dinámicas de la cavitación	45
6.3.	Efectos de la cavitación	49
6.3.1.	Caudal	49
6.3.2.	Presión	50
6.3.3.	Emisiones acústicas	52
6.4.	Análisis del nivel de gris	54
6.4.1.	Valor promedio del nivel de gris	56
6.4.2.	Desviación estándar del nivel de gris	58
6.4.3.	Largo de la cavitación adherida	59
6.4.4.	Evaluación del número adecuado de imágenes	60

6.5. Obtención de la onda de presión	61
6.5.1. Estimación de la fracción de vapor y de las propiedades del fluido	62
6.5.2. Atenuación de la amplitud de la onda de presión	63
7. Conclusiones	65
7.1. Aspectos a mejorar y trabajos futuros	66
Bibliografía	68
A. Mediciones de los distintos parámetros	73
B. Código usado para el análisis de gris	74
C. Largo de la cavitación adherida	76

Índice de tablas

5.1. <i>Composición del banco de ensayo</i>	32
5.2. <i>Especificaciones técnicas de la cámara</i>	32
5.3. <i>Sensores del banco de ensayo</i>	33
5.4. <i>Especificaciones técnicas del sonómetro</i>	35
5.5. <i>Propiedades físicas del agua líquida y del vapor de agua a 20°C</i>	41
A.1. <i>Mediciones experimentales</i>	73

Índice de figuras

3.1. Diagrama de fase del agua (Franc y Michel, 2005)	4
3.2. Cavitación por burbujas en un hydrofoil (a) que al disminuir σ se transforma en cavitación adherida (b) (Brennen, 2013)	7
3.3. Cavitación adherida (Franc y Michel, 2005)	8
3.4. Proceso de desprendimiento de una cavidad parcial producto del chorro reentrante (Franc y Michel, 2005)	8
3.5. Avance de una onda de choque sobre cavitación adherida en una cuña, obtenida mediante densitometría con rayos X, flujo de derecha a izquierda (Ganesh et al., 2016)	9
3.6. Vórtice en el tubo de aspiración de una turbina Francis (a) y vórtices de von Karman producidos por un plato plano (b) (Brennen, 2013)	10
3.7. Equilibrio de una microburbuja (Franc y Michel, 2005)	11
3.8. Dinámica del colapso de una burbuja inducida por láser (Akhatov et al., 2001)	13
3.9. Cambio de la geometría de una burbuja esférica que colapsa sobre una pared (Plesset y Chapman, 1971)	13
3.10. Erosión producida por cavitación de nubes en un tubo Venturi transcurrido un tiempo t (Petkovsek y Dular 2013)	14
3.11. Variación de la presión producida por una onda sonora (a) junto a las formas de expresar su amplitud (b) (Everest y Pohlmann, 2022)	16
3.12. Onda analógica de voltaje (a), a la que se aplica el proceso de muestreo en (b), luego el de cuantificación en (c). En (d) se observa el error inducido por ambos procesos (Smith, 1999)	18
3.13. Proceso de digitalización de una señal pura, con dos frecuencias de muestreo diferentes (Smith, 1999)	19
3.14. Filtros de paso bajo (a), paso alto (b), paso banda (c) y elimina banda (d) (Smith, 1999)	19

4.1.	Nivel de presión del ruido para sodio líquido y agua a 56 °C, en donde K es el número de cavitación (Ardiansyah et al., 2011)	23
4.2.	Nivel de presión sonora según relación de presión, para tres distintas p_{in} (Xu et al., 2020)	24
4.3.	Energía acústica según número de cavitación para distintas presiones a la entrada (p_1) (Soyama y Hoshino, 2016)	25
4.4.	Análisis espectral para agua a 56 °C y sodio líquido a 200 °C, en donde K es el número de cavitación (Ardiansyah et al., 2011)	25
4.5.	Análisis espectral según la frecuencia del variador de frecuencia (caudal de agua) (Kozublová et al., 2016)	26
4.6.	Medición de emisiones acústicas normalizadas por el valor máximo, con respecto a σ , en donde se utiliza en (a) hidrófono y en (b) un sensor de emisión acústica (Rus et al., 2007)	27
4.7.	Imagen de la cavitación con $\sigma = 1,34$, junto al valor promedio del nivel de gris (μ) y a la desviación estándar (s) (Rus et al., 2007)	27
4.8.	Onda de presión construida mediante el análisis estadístico de gris (Rus et al., 2007)	28
4.9.	Uso de un hidrófono (1) en un tubo Venturi (Xu et al., 2020)	29
4.10.	Ponderación temporal (a) y ponderación de frecuencias (b) (NTI Audio AG, sf)	30
5.1.	Plano del tubo Venturi; las medidas están en milímetros (Toro, 2024)	33
6.1.	Número de cavitación usando como referencia la presión a la entrada del tubo (a) y componentes del número de cavitación (b), ambos con respecto a la velocidad de rotación de la bomba	44
6.2.	Relación entre el número de cavitación y la velocidad de rotación de la bomba centrífuga	45
6.3.	Imagen de referencia (sin cavitación) cuando $\sigma = 1,40$	45
6.4.	Cavitación con $\sigma = 1,16$ (a) y $\sigma = 0,97$ (b)	46
6.5.	Cavitación con $\sigma = 0,91$	46
6.6.	Cavitación con $\sigma = 0,84$	47
6.7.	Imágenes no consecutivas de la cavitación con $\sigma = 0,72$	48
6.8.	Chorro reentrante	49
6.9.	Efecto de la cavitación sobre el caudal de agua	50
6.10.	Presión estática a la entrada y salida del Venturi (a) y relación de presiones (b), ambas con respecto al número de cavitación	51
6.11.	Presión estática en la garganta obtenida mediante la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la garganta del tubo	52

6.12. Nivel de presión sonora promedio, mínimo y máximo (a), nivel de presión sonora y desviación estándar desde $\sigma = 0,91$ o menor (b), ambos con respecto al número de cavitación	53
6.13. Rango entre las emisiones acústicas mínimas y máximas con respecto al número de cavitación	54
6.14. Valor promedio para $\sigma = 0,91$ (a), normalizado con una imagen de referencia (b), a la que se le aplica el ROI mostrado en (c). En (d) se observa el valor promedio luego de ambos procesos	55
6.15. Efecto del segmento libre de teflón sobre la desviación estándar para $\sigma = 1,52$. . .	56
6.16. Valor promedio del nivel de gris para $\sigma = 1,05$ (a), $\sigma = 0,91$ (b), $\sigma = 0,81$ (c) y $\sigma = 0,72$ (d)	56
6.17. Valor promedio del nivel de gris, sumado y normalizado con el valor máximo	57
6.18. Desviación estándar del nivel de gris para $\sigma = 1,05$ (a), $\sigma = 0,91$ (b), $\sigma = 0,81$ (c) y $\sigma = 0,72$ (d)	58
6.19. Desviación estándar del nivel de gris, sumado y normalizado con el valor máximo .	59
6.20. Largo de la cavidad adherida con respecto al número de cavitación	60
6.21. Variación porcentual entre el valor promedio calculado con distintos números de imágenes, según un paso de aumento de 10 imágenes, con $\sigma = 0,91$	60
6.22. Estimación de la onda de presión producida por el colapso de estructuras de la cavitación	61
6.23. Estimación de la fracción de vapor, a partir del valor promedio del nivel de gris, con respecto al número de cavitación	62
6.24. Propiedades físicas (velocidad del sonido (a), densidad (b) y viscosidad (c)) del flujo bifásico con respecto a σ	63
6.25. Atenuación de la onda de presión para tres distintas frecuencias junto a la presión sin atenuar p_0 (a) y presión acústica obtenida de las mediciones del nivel de presión sonora (b)	64
C.1. Análisis de gris para la obtención del largo promedio de la cavidad adherida, para los números de cavitación $\sigma = 1,05, 0,89, 0,83$ y $0,74$. En (a) se muestra el valor promedio y en (b) la desviación estándar	77

Nomenclatura

Símbolo	Significado, unidades
T	Temperatura, $^{\circ}C$
p	Presión absoluta, Pa
P	Potencia, W
V	Velocidad, m/s
Q	Caudal volumétrico, m^3/s
f	Frecuencia, hz
l	Longitud, m
s	Desviación estándar
S	Tensión superficial, N/m
R	Radio, m
I	Intensidad
c	Velocidad del sonido, m/s
N	Velocidad de rotación, rpm
	Número de datos/muestras
d	Diámetro, m
A	Área, m^2
Letras griegas	
σ	Numero de cavitación, <i>adimensional</i>
ρ	Densidad, kg/m^3
μ	Valor promedio
α	Fracción de vacío, <i>adimensional</i>
γ	Coefficiente de dilatación adiabática, <i>adimensional</i>
κ	Índice politrópico, <i>adimensional</i>
τ	Tiempo característico, s
Δ	Incremento
ξ	Coefficiente de perdida hidráulico
ω	Velocidad angular, rad/s
η	Viscosidad dinámica, Ns/m^2

Subíndices	
l	Líquido
v	Vapor
g	Gas
fb	Flujo bifásico
in	Entrada
out	Salida
th	Garganta
ref	Referencia
0	Estado inicial
c	Crítico
s	Muestreo
max	Valor máximo
∞	Referencia o cercano al lugar

Capítulo 1

Introducción

La cavitación consiste en el crecimiento de burbujas en zonas donde la presión estática disminuye hasta alcanzar la presión de vapor. Lo cual ocurre frecuentemente cuando el flujo aumenta de velocidad en pasajes estrechos o frente a piezas a alta velocidad, debido a que cuando aumenta la energía cinética, por conservación de la energía, disminuye la presión estática.

Las burbujas, llenas de vapor, se mueven rápidamente hacia zonas de mayor presión, en donde colapsan por efecto del aumento de presión, provocando vibraciones, emisiones sonoras, erosión y pérdida de eficiencia. De las consecuencias mencionadas, la más dañina es la erosión. En máquinas hidráulicas, como bombas y turbinas, es un fenómeno indeseable que siempre se pretende evitar debido a la reducción en la eficiencia. Sin embargo, existen varias áreas en donde la cavitación es beneficiosa, como lo son el tratamiento de aguas residuales, procedimientos médicos, procesos químicos, entre otros.

Recientemente se instala un tubo Venturi de sección circular en el Laboratorio de Termo Hidráulica del Campus San Joaquín, con el propósito de visualizar y estudiar el fenómeno de la cavitación. Este trabajo investigativo sigue esa misma línea, mediante el estudio de las emisiones acústicas. También se realiza un análisis estadístico de imágenes que pretende mostrar el vínculo entre las estructuras presentes en la cavitación con el ruido generado.

Los objetivos de este trabajo se muestran en el capítulo 2. En el capítulo 3 se entrega la información teórica referente a la cavitación, emisiones acústicas y procesamiento de señales acústicas. El estado del arte, con investigaciones recientes que pueden ser útiles, se encuentra en el capítulo 4. La metodología, procedimientos y equipamiento requerido se especifican en el capítulo 5. En el capítulo 6 se entregan los resultados, para finalmente desarrollar un análisis final en las conclusiones, presente en el capítulo 7.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo general

Registrar y analizar las emisiones acústicas producidas por la cavitación en un tubo Venturi, para contrastar estos resultados con imágenes de alta velocidad, realizando un análisis a las estructuras de la cavitación observadas.

2.2. Objetivos específicos

Con base en el objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Definir los parámetros que caracterizan la cavitación
- Verificar y adquirir los instrumentos de medición requeridos para el proceso experimental
- Realizar mediciones acústicas, así como también de presión, caudal y temperatura
- Observar y estudiar las estructuras de la cavitación, junto a los efectos que estas producen en el flujo
- Realizar un análisis estadístico a imágenes obtenidas con una cámara de alta velocidad, con el cual poder estimar la presión de colapso
- Correlacionar las mediciones acústicas con la estimación de la presión de colapso

Capítulo 3

Marco teórico

A continuación, se describen los fenómenos físicos asociados a la cavitación, se entregan definiciones, características, las formas en que se produce dentro de un flujo, así como también la dinámica de las burbujas. La segunda parte de este capítulo describe la teoría asociada a las emisiones acústicas o sonoras, en donde se abordan definiciones, conceptos básicos asociados a ondas, para terminar con el procesamiento digital de señales.

3.1. Cavitación

3.1.1. Definición

La cavitación se produce por la formación de cavidades de vapor dentro de un medio que inicialmente era homogéneo, debido al descenso de la presión estática, generalmente asociado a un aumento de velocidad en zonas estrechas, produciendo la formación y aumento de tamaño de burbujas. Las burbujas viajan aguas abajo e implosionan en zonas de mayor presión, generando ruido, vibraciones y ondas de presión (Franc y Michel, 2005). Las ondas de presión inciden sobre burbujas cercanas a la pared, las cuales colapsan de forma toroidal, creando un microchorro de agua que produce erosión en la superficie (Fortes-Patella et al., 2004).

Generalmente, aparece cavitación en tubos Venturi, pasajes estrechos de válvulas, impulsores de bombas y alabes de turbinas y de hélices marinas. También se puede originar en cuerpos en movimiento en un fluido quieto, sobre todo si este tiene ángulos afilados. En general, aparece en zonas en donde la presión estática disminuye por debajo de la presión de vapor. La intensidad y forma en que se presenta depende de las características geométricas y de las propiedades físicas del líquido (temperatura y aire disuelto).

Cuando se produce por caídas de presión en un fluido, se denomina cavitación hidrodinámica. Existe otro tipo de cavitación, producida por un campo oscilante de presión en fluidos estáticos, que se denomina cavitación acústica.

Para que se presente cavitación en un sistema, la presión debe disminuir por debajo de la presión de vapor; este proceso se realiza a temperatura casi constante. En la Figura 3.1 se observa la curva que conecta el punto triple del agua (T_r) con el punto crítico (C). Esta corresponde a la presión de vapor p_v , la cual depende de la temperatura del líquido (Franc y Michel, 2005).

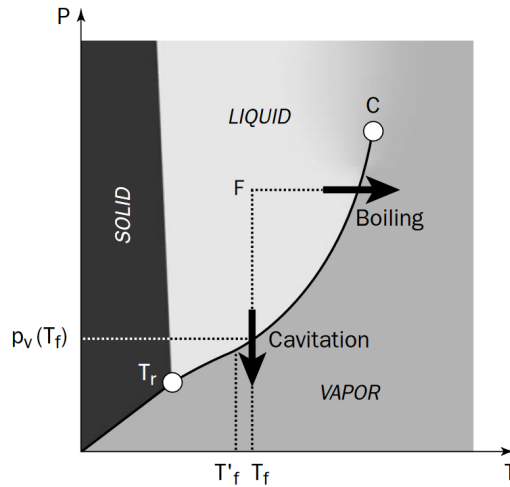


Figura 3.1: Diagrama de fase del agua (Franc y Michel, 2005)

La cantidad de vapor presente en el flujo con respecto al agua líquida, en fracción volumétrica, se define como la fracción de vapor (α). El valor de α depende de la intensidad y del tipo de cavitación.

3.1.2. Núcleos de cavitación

Corresponden a pequeñas burbujas de gas no condensable, inclusiones de vapor o micropartículas que operan como punto de inicio para producir cavitación. Pueden estar libres en el fluido o en pequeñas grietas presentes en las paredes del sistema (Franc y Michel, 2005); este es el caso de la nucleación heterogénea. También existe la nucleación homogénea producida por la formación de vacíos efímeros dentro del fluido debido a movimientos térmicos de las partículas, en donde se requiere un fluido libre de impurezas (Brennen, 2013).

La cavitación en sí misma es otra fuente generadora de microburbujas. Cuando las burbujas creadas por el proceso entran en zonas de alta presión aguas abajo, el vapor se condensa, pero

el aire no condensable crea una pequeña burbuja, la cual toma un tiempo en volver a disolverse. Debido a este fenómeno, los túneles de agua o cualquier tipo de circuito experimental cerrado que produzca cavitación debe considerar una zona de reabsorción de gases o un desaireador (Brennen, 2013).

Otro aspecto a tener en consideración son los gases disueltos en el agua. La presión producida por los gases no condensables tiene importancia en el balance de presiones de una burbuja en equilibrio (véase subsección 3.1.5). Sumado a lo anterior, está el efecto del intercambio de masa entre los núcleos de cavitación y los gases disueltos, vía difusión. Sin embargo, el tiempo para que se complete este proceso es del orden de algunos segundos, tiempo muy superior al que demora en crecer y colapsar una burbuja (Franc y Michel, 2005). Si bien los gases disueltos influyen en los núcleos de cavitación, experimentaciones recientes han demostrado que no interfiere significativamente ni en el comienzo de la cavitación ni en las estructuras que se producen (Mäkiharju et al., 2017), debido a la pequeña cantidad de masa que se intercambia mediante difusión entre los gases disueltos y una cavidad.

3.1.3. Números adimensionales

Existen dos números adimensionales con los que típicamente se caracteriza la cavitación, que son el número de Thoma (σ), comúnmente llamado número de cavitación, y el número de Strouhal (Str).

Número de cavitación

Es un parámetro adimensional que entrega la intensidad de la cavitación, así como también el grado o la etapa de esta. Para un sistema sin cavitación, entrega la tendencia a que se produzca. Se define según la Ecuación 3.1, en donde p_{ref} es una presión de referencia, p_v es la presión de vapor a la temperatura del fluido y Δp es la diferencia de presión estática que caracteriza el sistema.

$$\sigma = \frac{p_{ref} - p_v}{\Delta p} \quad (3.1)$$

Usualmente, la presión de referencia se mide en un lugar sin cavitación, pero cercano a la zona donde se produce. Δp depende del sistema; en máquinas hidráulicas es la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la máquina. En tubos Venturi, como se observa en la Ecuación 3.2, se utiliza la presión dinámica, la que corresponde a la energía cinética que tiene un fluido en movimiento, en donde ρ es la densidad y V la velocidad en la garganta del tubo.

$$\sigma = \frac{p_{ref} - p_v}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2} \quad (3.2)$$

El valor de σ en el cual aparece la cavitación se define como el número de cavitación incipiente σ_i . Se podría asumir que esto ocurre cuando la presión disminuye hasta alcanzar la presión de vapor; sin embargo, otras variables influyen en el proceso, como lo es la geometría del sistema, viscosidad, tensión superficial, temperatura, rugosidad de las paredes y la calidad del agua (Franc y Michel, 2005). Otros efectos adicionales que influyen son (Brennen, 2005):

- La capacidad del líquido de soportar la caída de presión hasta un punto específico por debajo de p_v , incluso alcanzando la tensión. Esto depende de la contaminación de líquido, especialmente de las propiedades y tamaño de los núcleos de cavitación.
- Los núcleos de cavitación requieren un tiempo específico de permanencia para crecer y volverse observables.
- Generalmente, el flujo se vuelve turbulento; entonces la presión en el medio de los vórtices puede ser menor a p_v al mismo tiempo que la presión media puede ser superior.

Número de Strouhal

Este se utiliza para analizar fluidos oscilatorios e inestables. Entrega la relación de fuerzas inerciales debido a inestabilidades del flujo o a aceleraciones, con respecto a las fuerzas inerciales atribuidas a cambios de velocidad (Dular y Bachert, 2009). Se define según la Ecuación 3.3, en donde f es la frecuencia de desprendimientos de nubes, l el largo promedio de la cavitación adherida previo al momento del desprendimiento y v la velocidad del chorro reentrante que provoca el desprendimiento. En tubos Venturi, comúnmente se utiliza la velocidad en la garganta para v y para l , el largo promedio de la cavitación adherida o el diámetro de la garganta del tubo.

$$Str = \frac{f \cdot l}{v} \quad (3.3)$$

3.1.4. Estructuras de cavitación

Dependiendo de las características geométricas, la generación y dinámica de crecimiento y colapso de las burbujas, la cavitación se presenta de diversas formas. Estos patrones o estructuras también están relacionados con la etapa, en donde se distinguen dos, incipiente o desarrollada. En la primera aparecen los primeros indicios, como lo son pequeñas burbujas; en la cavitación desarrollada, las estructuras se mantienen en el tiempo. A continuación se describen las estructuras de

la cavitación más comunes (Franc y Michel, 2005).

Burbujas aisladas

Aparecen cuando la cavitación no está plenamente desarrollada; al disminuir σ , aumenta la producción de las burbujas, como se ve en la Figura 3.2 (a). La cantidad y tamaño de las burbujas dependen principalmente de la distribución de presión y de la concentración de núcleos de cavitación. Aparecen en hydrofoils, en alabes de máquinas rotatorias y hélices. No son sensibles a características de la capa límite (como la separación de esta o del paso hacia la turbulencia). Al momento de colapsar permanecen casi esféricas; si están muy cerca de una superficie, son semi-esféricas, debido a la influencia de la pared (Franc y Michel, 2005).

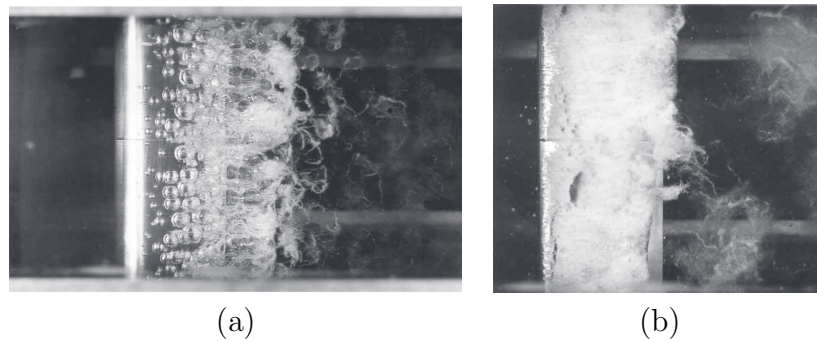


Figura 3.2: *Cavitación por burbujas en un hydrofoil (a) que al disminuir σ se transforma en cavitación adherida (b) (Brennen, 2013)*

Cavitación adherida

Es una capa de burbujas cuya forma permanece casi constante en una zona de baja presión. Su longitud puede variar y, bajo ciertas condiciones, desprende parte de su estructura, en forma de nube que viaja aguas abajo. Generalmente aparecen cuando se produce la separación de la capa límite, como en hydrofoil, alabes y tubos Venturi. Debido a que la presión dentro de la cavidad es menor a la presión del flujo exterior, se produce un chorro reentrante que ingresa una pequeña cantidad de agua dentro de la cavidad, como se observa en la Figura 3.3 (Franc y Michel, 2005).

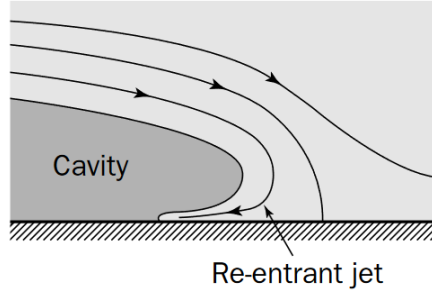


Figura 3.3: *Cavitación adherida (Franc y Michel, 2005)*

Nubes de cavitación y ondas de choque

Se denomina cavitación de nubes (a pesar de ser vórtices) a las estructuras generadas en el proceso de desprendimiento de la cavitación adherida. En la Figura 3.4 se observa la dinámica del proceso. Esta oscilación se representa con el número de Strouhal (subsección 3.1.2). Las principales variables que definen esta inestabilidad son el gradiente de presión adverso que genera el flujo externo a la cavidad y el grosor de esta (Callenaere et al., 2001). Si bien el gradiente de presión es el principal responsable de este fenómeno, las cavidades pequeñas (en longitud) se caracterizan por gradientes de presión más altos. Las cavidades largas son más sensibles a pequeños cambios de presión aguas arriba, por lo que igual presentan inestabilidad.

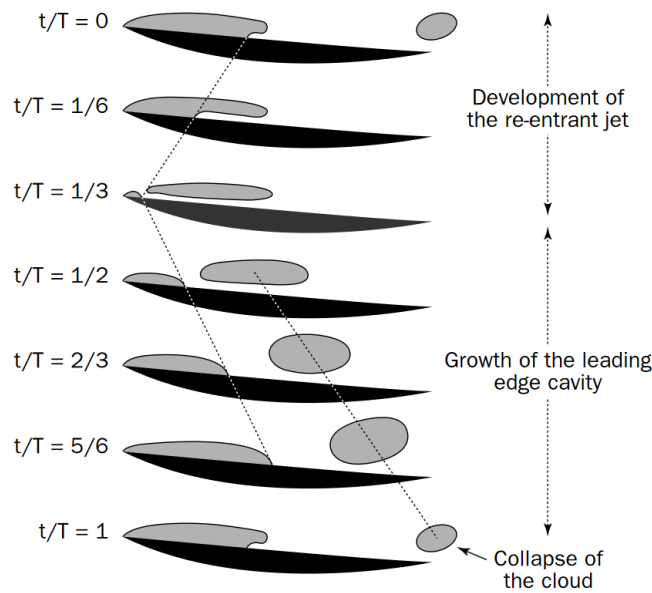


Figura 3.4: *Proceso de desprendimiento de una cavidad parcial producto del chorro reentrante (Franc y Michel, 2005)*

El colapso de la nube genera un pulso de presión, cuyas frecuencias bajas coinciden con la frecuencia de desprendimiento. Dentro de las frecuencias altas, Reisman et al. (1998) detecta dos tipos de pulsos de presión, resultantes de efectos globales y locales. Los globales se refieren a la sobrepresión que genera un colapso simultáneo de una gran variedad de burbujas; los locales, a un frente de fracción de vapor sobre los transductores de presión, que se interpreta como una onda de choque. Estas ondas son las responsables de la erosión y del ruido (Brennen, 2013). Mediante medición de la fracción de vapor con rayos X, Ganesh et al. (2016) logra capturar el avance de la onda de choque y visualizar el efecto que esta tiene sobre la cavidad (Figura 3.5), produciendo el desprendimiento de esta. También detecta que este es el principal método de desprendimiento para números de cavitación bajos.

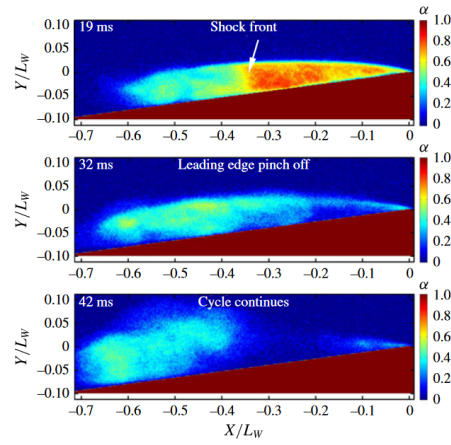


Figura 3.5: Avance de una onda de choque sobre cavitación adherida en una cuña, obtenida mediante densitometría con rayos X, flujo de derecha a izquierda (Ganesh et al., 2016)

Vórtices

Los vórtices generan zonas de baja presión en su centro, por lo que pueden aparecer antes que otras estructuras. Hay dos grandes grupos (Franc y Michel, 2005):

- Vórtices bien formados unidos a cuerpos sólidos, como por ejemplo vórtices en el borde de ataque de alas delta, en la punta y en el eje de hélices marinas, en el tubo de aspiración de turbinas hidráulicas (Figura 3.6 (a)) y en impulsores de bombas.
- Estructuras coherentes producidas en flujos cortantes con altos niveles de turbulencia, que viajan libres en el fluido, como lo son vórtices de Von Kármán producidos cuando el fluido choca con un obstáculo (Figura 3.6 (b)) y vórtices en zonas cortantes en estelas y chorros.

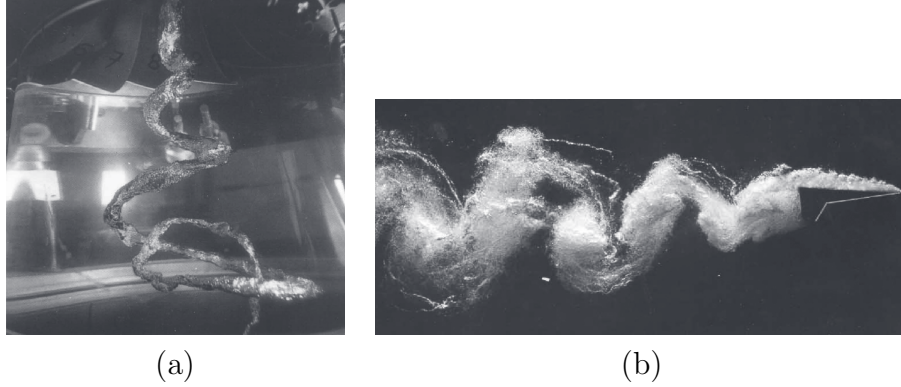


Figura 3.6: *Vórtice en el tubo de aspiración de una turbina Francis (a) y vórtices de von Karman producidos por un plato plano (b) (Brennen, 2013)*

3.1.5. Dinámicas de una burbuja

Fase de generación

Los primeros procesos que ocurren previo a que se produzca el fenómeno de la cavitación son el crecimiento de microburbujas, en donde primeramente los núcleos de cavitación entran en la zona de baja presión, se llenan de vapor de agua y eventualmente se saturan con vapor (Franc y Michel, 2005).

Para una microburbuja de radio R y tensión superficial S , que actúa como núcleo de cavitación, al encontrarse en equilibrio cumple con el balance de la Ecuación 3.4. La presión fuera de la microburbuja (p_∞) junto a la tensión superficial tienden a evitar que aumente su tamaño; contrariamente, la presión que generan los gases no condensables (p_g) y el vapor de agua (p_v) tienden a aumentar el tamaño de esta.

$$p_\infty = p_g + p_v - \frac{2S}{R} \quad (3.4)$$

Asumiendo un proceso isotérmico, la presión de un gas es inversamente proporcional al volumen de la burbuja. La Ecuación 3.5 permite obtener una relación para el valor de p_g , en donde el índice 0 indica el estado inicial para la presión de los gases y el radio de la burbuja (Franc y Michel, 2005).

$$p_g = p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (3.5)$$

De la Ecuación 3.5 y la Ecuación 3.4 se obtiene:

$$p_{\infty} = p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 + p_v - \frac{2S}{R} \quad (3.6)$$

Si se gráfica p_{∞} con respecto a R , se obtiene un valor mínimo en la presión y el radio, como se observa en la Figura 3.7, los cuales se denominan radio crítico R_c y presión crítica p_c . Otro aspecto interesante que muestra la figura es que p_c tiende a p_v a medida que el radio inicial de la microburbuja aumenta (Franc y Michel, 2005).

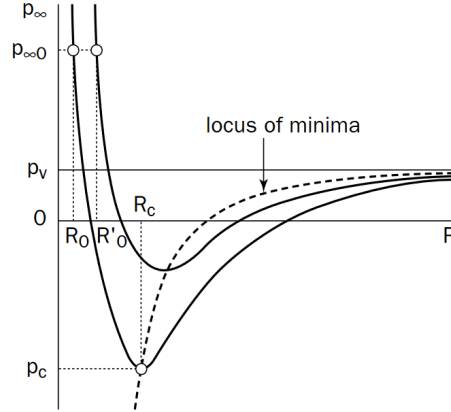


Figura 3.7: *Equilibrio de una microburbuja (Franc y Michel, 2005)*

R_c se obtiene derivando la Ecuación 3.6 con respecto a R e igualando este valor a 0. A continuación se observan las ecuaciones del radio y de la presión crítica:

$$R_c = R_0 \sqrt{\frac{3p_{g0}}{2S/R_0}} \quad (3.7)$$

$$p_c = p_v - \frac{4S}{3R_c} \quad (3.8)$$

Si una microburbuja entra en una zona de baja presión, en donde la presión es inferior a p_c , crecerá de forma inestable hasta transformarse en una burbuja visible, la cual, aguas abajo, implosionará. Si esta condición no se cumple, solo aumentará levemente su tamaño para luego retornar a su tamaño inicial.

Ecuación de Rayleigh-Plesset

La ecuación describe el comportamiento de una burbuja esférica que se mueve dentro de un fluido y experimenta un campo variable de presión (Plesset, 1949). Plesset desarrolla esta ecuación a partir del trabajo realizado por Lord Rayleigh (1917).

Se supone un líquido incompresible, con viscosidad constante; el contenido de aire dentro de la burbuja es constante y el vapor presente en esta tiene como presión parcial la presión de vapor. El radio de la burbuja para un tiempo t es $R(t)$, r es el radio en cualquier parte del líquido usando como centro de coordenadas el centro de la burbuja, la temperatura T_∞ fuera de la burbuja se considera constante, la presión $p_\infty(t)$ se asume conocida. La presión $p_b(t)$ y temperatura $T_b(t)$ dentro de la burbuja se consideran homogéneas. Si se asume una compresión del gas dentro de la burbuja como adiabática (con índice politrópico igual a $\gamma = c_p/c_v$), la ecuación de Rayleigh-Plesset es:

$$\rho \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right) = p_v - p_\infty(t) + p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2S}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \quad (3.9)$$

Esta permite determinar la evolución del radio de la burbuja (R) cuando se conoce $p_\infty(t)$. El término izquierdo de la Ecuación 3.9 indica la variación de la energía cinética del líquido; los primeros 3 términos derechos indican el efecto de las fuerzas de presión, el cuarto término indica el impacto de la tensión superficial y, por último, el quinto término representa el radio de disipación debido a la viscosidad.

Fase de colapso

Según se observa en la Ecuación 3.9, los términos que representan el gas no condensable, la tensión superficial y la viscosidad contienen a R en su denominador. En la etapa de colapso, el tamaño de la burbuja aumenta; por consiguiente, pueden despreciarse estos términos, con lo que se obtiene la siguiente ecuación, la cual permite calcular el valor $R(t)$, mediante integración numérica.

$$\frac{dR}{dt} = -\sqrt{\frac{2(p_\infty - p_v)}{3\rho} \left(\frac{R_{max}^3}{R^3} - 1 \right)} \quad (3.10)$$

Integrando $\dot{R}(t)$ entre R_{max} y 0 se obtiene el tiempo de colapso τ , también llamado el tiempo de Rayleigh:

$$\tau \cong 0,915 R_{max} \sqrt{\frac{\rho}{p_\infty - p_v}} \quad (3.11)$$

Nótese de la Ecuación 3.10 que cuando el radio de la burbuja tiende a 0, $\dot{R}$ tiende a infinito; la velocidad de colapso físicamente está limitada por cualquier cantidad de gas no condensable atrapado en la burbuja. Otro aspecto que tiene relevancia es la compresibilidad del fluido bifásico que rodea la burbuja cuando la velocidad de la pared, al colapsar, es cercana a la velocidad del sonido en el medio. Sin embargo, experimentaciones numéricas han demostrado que es más importante el contenido de gas no condensable, incluso en pequeñas cantidades, limitando a $\dot{R}$, más que si el

flujo exterior es compresible o incompresible. Con respecto al radio mínimo que alcanza la burbuja al colapsar, este depende tanto de la compresibilidad del flujo exterior, así como también de la cantidad de gas no condensable (Blake, 2017). La compresión del gas no condensable dentro de la burbuja influye en los rebotes que se producen (Akhatov et al., 2001). En la Figura 3.8 se observa el colapso y dos rebotes de una burbuja.

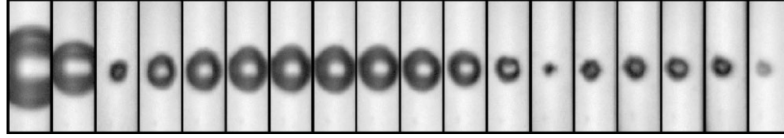


Figura 3.8: *Dinámica del colapso de una burbuja inducida por láser (Akhatov et al., 2001)*

Al momento del colapso, la geometría esférica se conserva en burbujas individuales, indistinto del medio en el que están; sin embargo, en tubos Venturi e hydrofoil, la geometría se pierde debido al gradiente de presión que se produce y a la turbulencia. A pesar de esto, estas tienen un comportamiento similar a burbujas esféricas (Blake, 2017). Otro aspecto importante es si el colapso se produce cerca de una superficie. Esto último se observa en la Figura 3.9, en donde se muestra el resultado numérico del colapso de una burbuja de 1 [mm] de radio cuyo centro también se encuentra a 1 [mm] de una pared. Esto provoca la formación de un microjet de alta velocidad que impacta la pared; este es el mecanismo involucrado en la erosión (Franc y Michel, 2005).

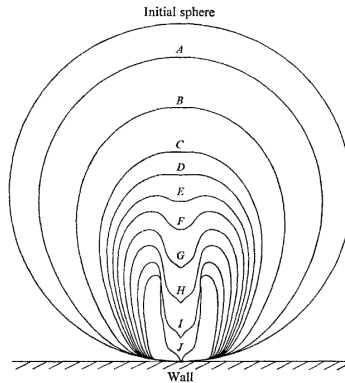


Figura 3.9: *Cambio de la geometría de una burbuja esférica que colapsa sobre una pared (Plesset y Chapman, 1971)*

3.1.6. Efectos de la cavitación

La cavitación produce una serie de efectos negativos en sistemas hidráulicos debido al colapso violento de cavidades de vapor. Las principales son pérdida de desempeño (pérdida de eficiencia en turbomáquinas, disipación de energía, disminución de caudal evacuado en aliviaderos, aumento del

arrastre en hydrofoils), erosión, aparición de fuerzas adicionales en estructuras, emisiones acústicas y vibraciones (Franc y Michel, 2005).

El efecto más perjudicial es la erosión, que puede llegar a ser destructiva. Esta se produce por la concentración de energía mecánica en un área muy pequeña, excediendo la resistencia del material. El colapso de un grupo de burbujas produce una onda de choque de aproximadamente 100 $[kPa]$ de amplitud, la cual actúa sobre burbujas cercanas a la pared. Estas oscilan y colapsan de forma no esférica creando un microchorro, que alcanza velocidades de hasta 100 $[m/s]$, presiones de hasta 1 $[GPa]$ y duración de aproximadamente 1 $[ns]$ (Dular et al., 2004). Recientemente, en experimentaciones realizadas por Petkovsek y Dular (2013), se observa que la erosión se produce cuando colapsa una nube cavitante y no cuando esta se genera o desprende, en donde no es necesario que la cavitación de nubes sea periódica. En la Figura 3.10 se observan las zonas en donde se produce la erosión, siendo estas principalmente debajo de la zona de colapso y de cavitación adherida.

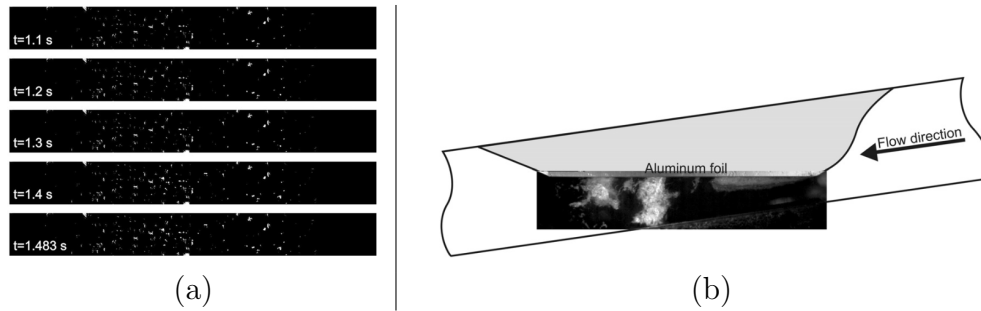


Figura 3.10: *Erosión producida por cavitación de nubes en un tubo Venturi transcurrido un tiempo t (Petkovsek y Dular 2013)*

También influye la velocidad del agua; el nivel de pérdida de material es directamente proporcional a esta. Una forma de disminuir la agresividad de la cavitación es mediante la ventilación (inyección de aire al fluido); esta técnica es común en aliviaderos (Franc y Michel, 2005).

Existe una serie de situaciones en donde la cavitación es beneficiosa, como en limpieza de superficies mediante cavitación acústica o chorros cavitantes a alta presión, dispersión de partículas en un medio líquido, producción de emulsiones, mejoramiento del proceso de electrodeposición, limitación del caudal y tratamiento de aguas residuales (Franc y Michel, 2005). También tiene usos en el ámbito médico, en la eliminación de cálculos en los riñones (litotricia), remoción quirúrgica de cataratas oculares mediante el proceso de facoemulsificación y para aumentar la porosidad celular en zonas específicas mediante cavitación producida por ultrasonidos (Brennen, 2015).

3.1.7. Emisiones acústicas producidas por la cavitación

El sonido se produce por las altas presiones momentáneas que se generan al comprimir el contenido de las burbujas. La presión acústica irradiada por el colapso de una burbuja se obtiene según la Ecuación 3.12, en donde V es el volumen de la burbuja y r es la distancia entre el centro de la burbuja y el lugar donde se mide el ruido producido. Se observa la influencia de d^2V/dt^2 , lo que indica que el ruido irradiado depende del tamaño de la burbuja cuando está cerca del valor mínimo (Brennen, 2013).

$$p_a = \frac{\rho_l}{4\pi r} \frac{d^2V}{dt^2} \quad (3.12)$$

Las emisiones sonoras están caracterizadas por el aumento de frecuencias altas; sin embargo, también aparecen frecuencias bajas y medias. Con valores de σ bajos se produce el colapso de distintos tipos de estructuras, como lo son burbujas aisladas, nubes de burbujas y vórtices, en donde la forma de las burbujas al momento de colapsar y la distancia entre estas influye en la intensidad de las emisiones acústicas (Franc y Michel, 2005). La pérdida de esfericidad produce un colapso menos concentrado, lo que genera menos ruido.

Para un valor fijo de σ , el ruido depende de la velocidad del fluido: a mayor velocidad, mayor ruido. Con una velocidad fija, al disminuir σ , primero aumenta la intensidad de las emisiones al momento de la cavitación incipiente; luego el ruido alcanza un máximo para finalmente disminuir. Esto se debe a que, al disminuir mucho σ , se forma una gran cantidad de pequeñas burbujas que crean una gran cavidad que disminuye el ruido producido. Para cavitación de burbujas, el ruido aumenta con la disminución de σ de forma continua, siempre y cuando las burbujas permanezcan separadas y el aire no condensable contenido en estas sea pequeño (Franc y Michel, 2005).

La característica principal que distingue el ruido producido por la cavitación por sobre otras fuentes emisoras de ruido en un fluido es el aumento abrupto del ruido una vez iniciada la cavitación. También existe un cambio en las frecuencias que componen el ruido; desde la cavitación incipiente a la plenamente desarrollada, existen frecuencias que dominan por sobre otras. Este valor pasa a frecuencias más bajas a medida que aumenta el desarrollo de la cavitación (Blake, 2017).

Existe una vinculación entre las emisiones acústicas y la erosión; Varga y Sebestyen (1966) encuentran una relación entre la intensidad acústica y la erosión producida en un cilindro de bronce en un túnel de agua. Kato et al. (1989) obtienen resultados similares para un hydrofoil 2-D. Con esto se demuestra que estos dos efectos de la cavitación dependen de la misma dinámica de estructuras.

3.2. Señales acústicas

3.2.1. Definición

El sonido se produce por el movimiento de ondas en un medio elástico, como puede ser aire, agua, concreto, etc. Cuando una partícula es desplazada por la presión asociada a la onda acústica, las fuerzas elásticas tienden a regresarla a su posición inicial. Cuando esto ocurre, debido a la inercia de la partícula, sobrepasa dicha posición y vuelve a actuar la fuerza elástica. El mecanismo oscilatorio se basa en las fuerzas elásticas y de inercia (Everest and Pohlmann, 2022).

En la parte superior de la Figura 3.11 (a) se observa el comportamiento de las partículas; esta oscilación es de tipo longitudinal. En las zonas de compresión, la presión es levemente superior a la presión atmosférica; en las zonas de rarefacción, ocurre lo contrario.

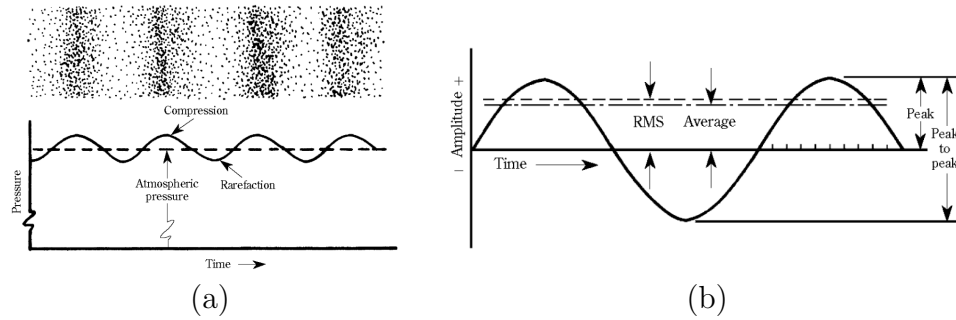


Figura 3.11: Variación de la presión producida por una onda sonora (a) junto a las formas de expresar su amplitud (b) (Everest y Pohlmann, 2022)

En la Figura 3.11 se observa la representación de una onda sonora pura, con frecuencia y amplitud únicas. Sin embargo, cualquier tipo de emisión sonora o ruido se puede representar como una suma de múltiples ondas sinusoidales, con distintas frecuencias, amplitudes y fases. Estas se definen como ondas complejas (Everest and Pohlmann, 2022).

Existen diversas formas de considerar la amplitud de una onda (Figura 3.11 (b)). Las formas más simple son el valor máximo (peak) y la distancia de pico a pico; esto es adecuado para ondas puras. La forma más adecuada de expresar la amplitud de una onda compleja es mediante el valor eficaz RMS (root mean square), para lo cual se requiere elevar al cuadrado los valores que conforman la onda, sumarlos, obtener el promedio de estos y, finalmente, aplicar raíz cuadrada (Everest and Pohlmann, 2022).

Potencia, intensidad y presión acústica

La potencia acústica es la energía por unidad de tiempo liberada en forma de sonido; se conserva a medida que esta se propaga. Para una onda sonora en un campo sonoro sin interrupciones, la potencia se divide en un área esférica. La intensidad acústica es la potencia acústica por unidad de área; por consiguiente, disminuye con un factor de la distancia al cuadrado.

Los instrumentos de medición acústica no miden la intensidad (a excepción de las sondas de intensidad acústicas) ni la potencia porque resulta muy complejo; miden en cambio la presión acústica. Esta corresponde al aumento y disminución periódica de la presión (amplitud de la onda sonora). La relación entre la presión e intensidad acústica se observa en la ecuación 3.13, en donde I_0 es la intensidad acústica, ρ es la densidad y c es la velocidad del sonido, ambas referentes al medio por el que se transporta la oscilación (Attenborough y Postema, 2008).

$$I_0 = \frac{p^2}{\rho c} \quad (3.13)$$

Nivel de presión sonora

La Ecuación 3.14 muestra el nivel de presión sonora SPL (sound pressure level), en donde p es la presión acústica con amplitud RMS y p_0 es la referencia. Se expresan mediante logaritmos, ya que así se puede mostrar un rango muy amplio de valores. El valor de 10 es para transformar las ecuaciones de la unidad de belio $[B]$ a decibelio $[dB]$ (Everest and Pohlmann, 2022).

$$SPL = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad (3.14)$$

Para el sonido dispersado por aire, se usa como referencia el límite de audición humana para una onda sinusoidal de 1 [kHz], el cual es de 20 $[\mu\text{Pa}]$. Cuando se mide sonido dispersado en agua, se usa la referencia de 1 $[\mu\text{Pa}]$.

3.2.2. Procesamiento digital de señales

El procesamiento digital de señales son los algoritmos, formulaciones matemáticas y procesos para manipular señales, para que se transformen a una forma digital. La principal característica de una señal analógica es que es continua. Para transformar esta señal a una digital (o discreta) se requieren dos procesos, muestreo y cuantificación (Smith, 1999).

El proceso de muestreo tiene relación con la variable temporal, existe un paso de tiempo Δt en el que consecutivamente se registra el valor de la amplitud de la onda analógica, como se

observa en la Figura 3.12 (b). Si la frecuencia de muestreo es de 44 [kHz] , significa que en $1[s]$ se registraron 44,000 valores de la amplitud; por consiguiente, el paso de tiempo fue de $2,27 \cdot 10^{-5}[s]$.

El proceso de cuantificación tiene relación con la magnitud que se esté procesando. La amplitud de la onda analógica se divide en un número de intervalos debido a que va a existir un número fijo de valores que la amplitud puede tomar. En la Figura 3.12(c) se observa que la onda analógica queda contenida dentro del grosor de los segmentos. Por ejemplo, para la onda de la Figura 3.12 (a), la amplitud varía entre $0 - 4,096 \text{ [V]}$; si se cuantifica con 12 bits, el intervalo de la amplitud se divide en 4,096 posibles valores ($2^{12} = 4,096$). El paso entre cada posible valor es de $10^{-3}[V]$.

Ambos procesos inducen error, el cual se observa en la Figura 3.12(d) (Smith, 1999).

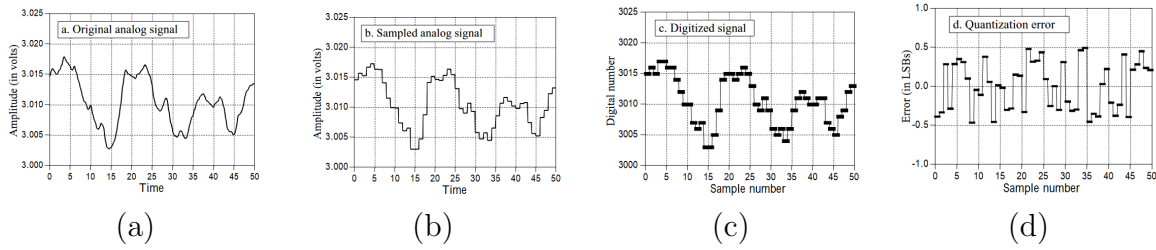


Figura 3.12: Onda analógica de voltaje (a), a la que se aplica el proceso de muestreo en (b), luego el de cuantificación en (c). En (d) se observa el error inducido por ambos procesos (Smith, 1999)

Teorema de muestreo de Nyquist

Para aplicar correctamente el proceso de digitalización a una onda analógica, se requiere que la frecuencia de muestreo f_s sea de al menos el doble que la frecuencia más alta contenida en la onda. En la Figura 3.13 se observan dos ejemplos, en donde la línea continua corresponde a dos ondas analógicas puras de distinta frecuencia y los cuadrados son los valores registrados aplicando f_s distintas. En la derecha de la Figura 3.13 se nota cómo se obtuvo una onda de menor frecuencia; esto se denomina aliasing (alias). Para evitar la aparición de frecuencias espurias al momento de digitalizar, se requiere eliminar cualquier frecuencia en el rango entre la frecuencia máxima que se puede digitalizar ($0,5$ veces la f_s) y f_s . Esto se logra con un filtro anti-aliasing (Smith, 1999).

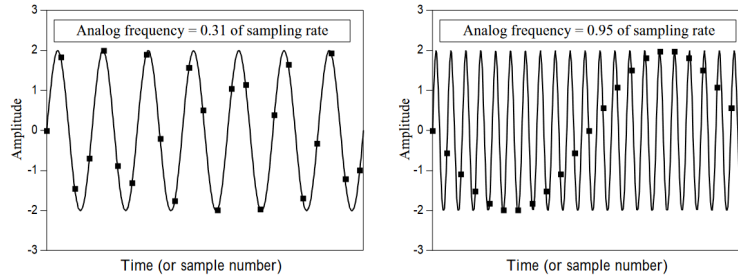


Figura 3.13: *Proceso de digitalización de una señal pura, con dos frecuencias de muestreo diferentes (Smith, 1999)*

Filtros

Corresponde al proceso de eliminar una sección o rango de frecuencias que componen una señal. Se pueden filtrar ondas analógicas o digitales. Los filtros más comunes se observan en la Figura 3.14 (Smith, 1999).

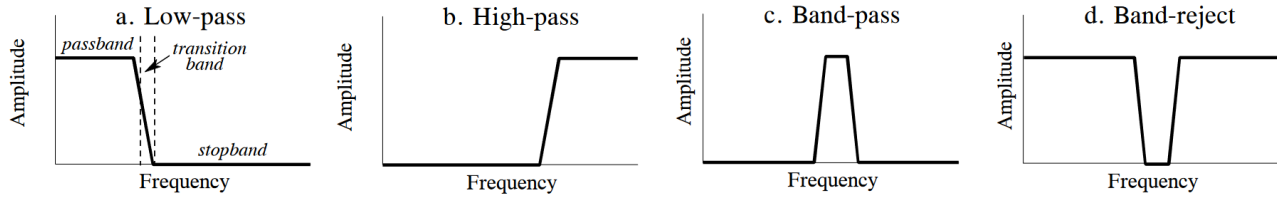


Figura 3.14: *Filtros de paso bajo (a), paso alto (b), paso banda (c) y elimina banda (d) (Smith, 1999)*

3.2.3. Análisis espectral de frecuencias

El análisis de señales mediante el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) permite obtener las frecuencias que componen una señal acústica, sea esta estacionaria o transitoria. Su uso se basa en la resolución de la transformada de Fourier con un logaritmo altamente eficiente, la que permite expresar cualquier función periódica como la suma de funciones sinusoidales (Cerna and Harvey, 2000). Se distinguen dos dominios: tiempo y frecuencias.

El dominio tiempo corresponde a la señal registrada con respecto al tiempo, y lo relacionado con la adquisición de datos. Para una frecuencia de muestreo f_s fija, se adquiere un número específico de datos N en un tiempo total de adquisición T . El dominio frecuencias corresponde al espectro de frecuencia que compone la señal registrada, una vez aplicado el análisis FFT. Está conformado por la amplitud de las ondas (constitutivas de la señal) con respecto a la frecuencia de estas. La frecuencia se divide en un número específico de valores, que se denominan líneas de frecuencia;

la diferencia entre dos líneas de frecuencia consecutivas se define como resolución de frecuencia Δf . Este valor depende del número de datos adquiridos según la Ecuación 3.15, asumiendo una frecuencia de muestreo fija.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (3.15)$$

La resolución de frecuencia y el número de datos adquiridos son inversamente proporcionales, por lo que se requiere aumentar N para disminuir Δf . Esto puede ser una desventaja cuando se tiene un suceso que dura un instante de tiempo (Cerna and Harvey, 2000).

Capítulo 4

Estado del arte

A lo largo de las últimas décadas se han realizado una gran variedad de experimentos cuyo propósito ha sido comprender las emisiones acústicas producidas por la cavitación. A continuación, se describen trabajos recientes realizados en tubos Venturi. Debido a la disminución de la sección presente, convierte a este en un mecanismo fácil y práctico de producir y observar el fenómeno de la cavitación.

4.1. Configuración experimental

La configuración necesaria para realizar un análisis experimental de emisiones acústicas consiste en un circuito cerrado por el que fluye agua, en donde se pueda controlar el caudal de agua Q , la presión a la entrada del tubo Venturi p_{in} e idealmente la presión en el estanque, para poder controlar la presión a la salida del tubo p_{out} . Esta última variable no siempre se controla, ya que no es indispensable para producir cavitación; este tipo de circuitos se denomina abierto.

En general, se requiere medir presión a la entrada, la salida y la garganta del tubo; la temperatura del agua; el caudal y la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Algunos circuitos también tienen un intercambiador de calor para controlar la temperatura del agua, así como también otro tipo de sensores (acelerómetros, cámaras de alta velocidad, etc.).

4.2. Caracterización de la cavitación

Con el propósito de comparar distintos trabajos experimentales que estudien la cavitación y considerando las múltiples variables que influyen en el fenómeno, se requiere usar un parámetro que refleje el estado de la cavitación. Lo más apropiado es usar el número de cavitación (σ); sin

embargo, otras investigaciones (Xu et al., 2020) usan la relación de presiones p_r , la cual se calcula dividiendo la presión a la salida del tubo Venturi por la presión a la entrada, $p_r = \frac{p_{out}}{p_{in}}$. Nótese que al usar esta última expresión no se considera la temperatura del agua (al no considerar p_v ni ρ) ni el caudal (al no considerar la velocidad del agua).

Si bien se pueden realizar mediciones acústicas simplemente variando el número de cavitación, algunos estudios consideran estados característicos. El primer estado a tener en consideración es flujo sin cavitación, el que se considera como un estado de referencia. Dentro de los estados de la cavitación que aparecen a medida que disminuye σ están (Rudolf et al., 2014):

- Incipiente: aparecen pequeñas burbujas en la garganta del tubo.
- Parcial: corresponde a cavitación adherida con desprendimientos periódicos de su estructura.
- Desarrollada: se observan nubes que cubren gran parte de la zona divergente.
- Máximo desarrollo: a criterio de la investigación.

Se puede considerar el desarrollo máximo de varias formas. Primeramente, cuando se logra la supercavitación, la que ocurre cuando la estructura de la cavitación es mayor al espacio disponible dentro del tubo Venturi (Ferrari, 2017). Segundo, cuando se produce un chorro de agua con el mismo diámetro de la garganta, que fluye libremente, el resto de la zona divergente se llena de burbujas (Rudolf et al., 2014).

4.2.1. Procedimiento experimental

Si no se tiene control de la presión en el estanque (p_{out}), el procedimiento consiste en controlar p_{in} mediante el flujo de agua (Kozublová et al., 2016). Sobre p_{in} también influyen las pérdidas que se producen antes del tubo, ya que estas dependen de la velocidad del agua.

Cuando se tiene un circuito cerrado, se puede modificar y establecer un valor fijo de p_{out} , ya sea presurizando el estanque con aire comprimido o disminuyendo la presión con una bomba de vacío. Luego se cambia p_{in} de la misma forma que el caso anterior, para luego repetir el procedimiento con otros valores fijos de p_{out} (Jahangir et al., 2019; Sayyaadi, 2010). Este procedimiento también es posible controlando p_{out} con una válvula a la salida del tubo Venturi (Soyama y Hoshino, 2016).

Cuando se usa p_r en vez de σ , y de forma similar al caso anterior, pero sin usar un variador de frecuencia, se puede establecer un valor fijo de p_{in} con una válvula anterior a la entrada del Venturi, para luego obtener diferentes valores de p_{out} cerrando la válvula a la salida. Este procedimiento se

repente para otros valores de p_{in} (Long et al., 2017; Xu et al., 2020).

4.3. Análisis de señales acústicas

Existen dos tipos de análisis que comúnmente se realizan en experimentaciones similares: análisis de presión sonora y análisis espectral de frecuencias.

4.3.1. Nivel de presión sonora

Según se menciona en la Sección 3.1.7, se espera que las emisiones acústicas aumenten, alcancen un máximo y luego disminuyan levemente a medida que aumenta el grado de cavitación. Ardiansyah et al. (2011) realizan un análisis de emisiones sonoras a un tubo Venturi operado por sodio líquido; se obtiene que el nivel de presión del sonido aumenta cuando se alcanza la cavitación desarrollada (σ cerca de 1) y se mantiene relativamente constante a medida que disminuye σ . Siguiendo el mismo procedimiento, pero usando agua, se obtiene un aumento relativamente constante de la intensidad del sonido a medida que disminuye σ , como se ve en la Figura 4.1.

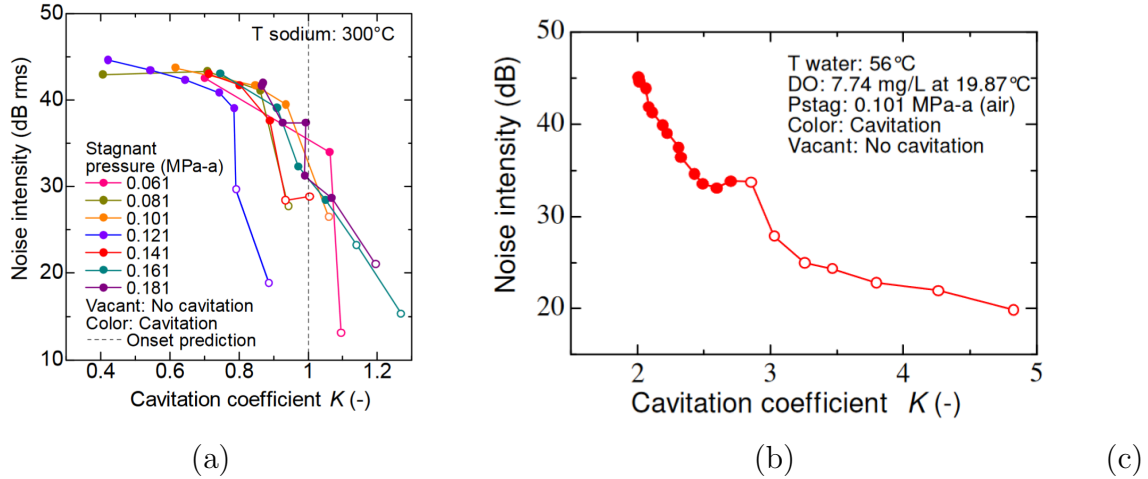


Figura 4.1: Nivel de presión del ruido para sodio líquido y agua a 56°C , en donde K es el número de cavitación (Ardiansyah et al., 2011)

Xu et al. (2020) miden el nivel de presión sonora para un tubo Venturi con cuatro etapas, caracterizadas por los métodos de desprendimiento de nubes de cavitación. Cuando la cavitación está desarrollada, se obtuvo un máximo local, el cual disminuye levemente a medida que aumenta p_r (disminuye la intensidad de la cavitación). Bajo presiones de salida más altas se alcanza el

máximo nivel, para finalmente, en un estado sin cavitación, disminuir y estabilizarse, como se observa en la Figura 4.2.

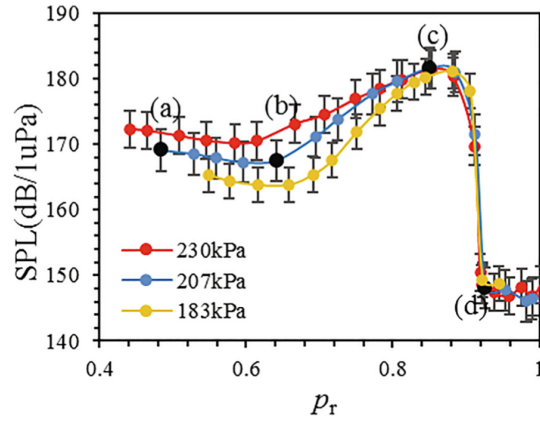


Figura 4.2: Nivel de presión sonora según relación de presión, para tres distintas p_{in} (Xu et al., 2020)

Con respecto al análisis de los métodos de desprendimiento y su influencia en el ruido y las vibraciones, se detecta, según la Figura 4.2, que en el punto (c) (en donde se obtiene la máxima intensidad de ruido), solo se produce la zona de colapso caracterizada por la generación de ondas de choque; esto explicaría la máxima intensidad sonora en ese punto. Esto es contrario a lo reportado por Ganesh et al. (2016).

El nivel de presión sonora no solo depende de σ , sino también de la presión. Según reportan Soyama y Hoshino 2016, en donde, para un valor de σ fijo, se varía la presión de entrada (en este caso p_1), detectándose un aumento de la energía acústica, como se ve en la Figura 4.3. Algo similar, pero con respecto a la velocidad, obtienen Stoffel y Schuller (1992), en donde al aumentar la velocidad del agua pero dejando constante σ , se registra un aumento del ruido.

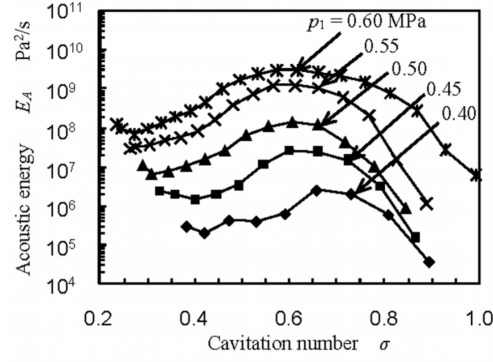


Figura 4.3: *Energía acústica según número de cavitación para distintas presiones a la entrada (p_1) (Soyama y Hoshino, 2016)*

4.3.2. Análisis espectral de frecuencias

Se han realizado múltiples experimentaciones que estudian las frecuencias contenidas en las emisiones acústicas de la cavitación. Bark y Van Berlekom (1979) detectan un aumento de todo el rango de frecuencias una vez producida la cavitación; dicho aumento depende de las estructuras de la cavitación. Del trabajo que realizan Stoffel y Schuller (1992) se detecta un comportamiento similar. En la misma línea, pero con sodio líquido y agua (a 56 °C), Ardiansyah et al. (2011) obtienen el mismo comportamiento, como se observa en la Figura 4.4.

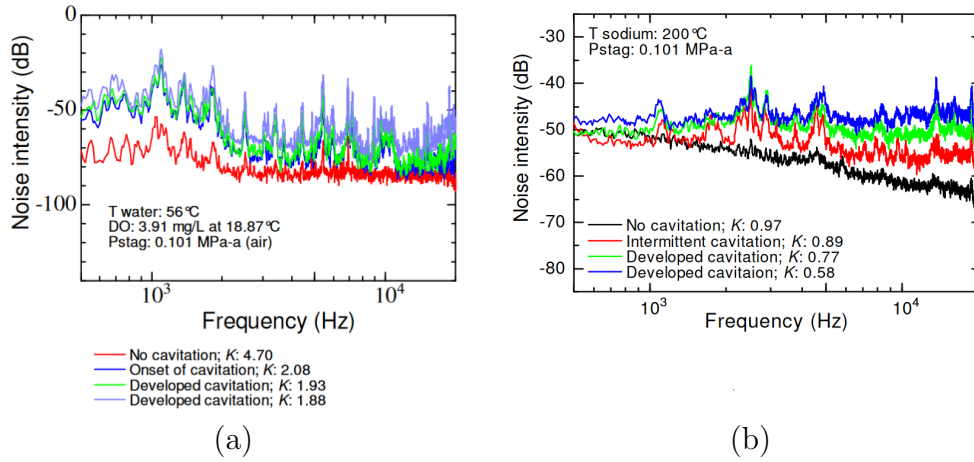


Figura 4.4: *Análisis espectral para agua a 56 °C y sodio líquido a 200 °C, en donde K es el número de cavitación (Ardiansyah et al., 2011)*

Otro aspecto que destacar es que cuando se logra la cavitación desarrollada, la intensidad del sonido no varía mucho a medida que disminuye σ . Ardiansyah et al. (2011) lo atribuyen a una condición de ahogamiento, ya que, a medida que disminuye σ , la velocidad (y por consiguiente el flujo másico) se vuelve casi constante.

Si bien, el análisis espectral muestra un comportamiento similar en los experimentos anteriores, Kozublová et al. (2016) obtienen, mediante el uso de una sonda de intensidad acústica, una frecuencia superior en el espectro, 4 [kHz], que al aumentar la intensidad de la cavitación, se divide en dos picos de intensidad, 3 [kHz] y 5 [kHz], como se aprecia en la Figura 4.5. Esto se asocia a la presencia de dos tipos de cavitación, gaseosa y de vapor. Mancuso (2018), usando un sonómetro, también obtiene los dos máximos locales antes mencionados, cuando mide emisiones acústicas a un reactor de flujo giratorio en el que se produce cavitación.

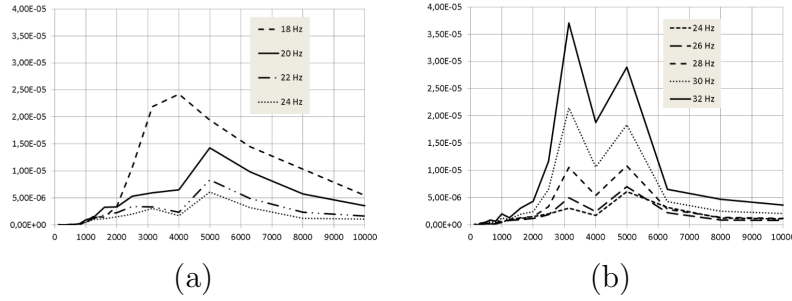


Figura 4.5: *Análisis espectral según la frecuencia del variador de frecuencia (caudal de agua) (Kozublová et al., 2016)*

4.4. Análisis estadístico de imágenes

Rus et al. (2007) realizan mediciones acústicas a la cavitación producida en una turbina Kaplan con solo dos álabes, utilizando un hidrófono y un sensor de emisión acústica, como se observa en la Figura 4.6 (a) y (b), respectivamente. Las mediciones sonoras mostraron la misma tendencia: un aumento ligero a medida que aparece la cavitación en la punta (tip) y en la base de los álabes, hasta llegar a un valor máximo, luego una disminución abrupta, para finalmente, volver a aumentar, pero sin llegar a alcanzar el valor máximo anteriormente registrado.

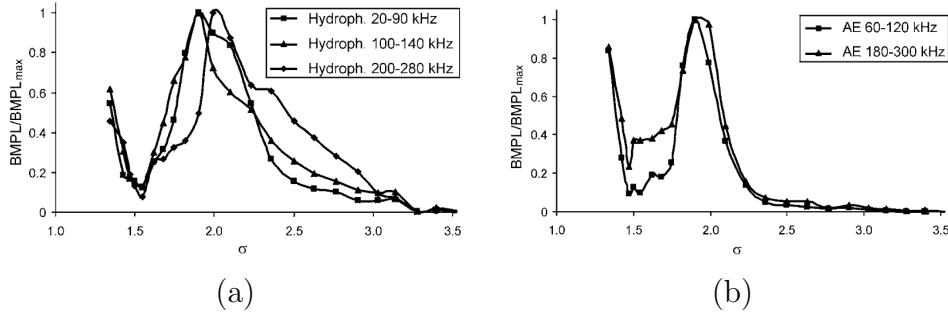


Figura 4.6: Medición de emisiones acústicas normalizadas por el valor máximo, con respecto a σ , en donde se utiliza en (a) hidrófono y en (b) un sensor de emisión acústica (Rus et al., 2007)

Al principio solo hay burbujas microscópicas, luego aparecen burbujas observables a simple vista para finalmente encontrar nubes de burbujas; aquí es donde se obtienen las mediciones acústicas máximas. Luego, le sigue una disminución abrupta que, según los investigadores, tiene relación con la amortiguación de las ondas de presión gracias a la alta compresibilidad del flujo bifásico, el cual cubre todo el alabe; aquí se alcanza el valor de registro acústico mínimo. Finalmente, vuelven a aumentar las emisiones sonoras debido a que existe una superficie libre entre fases; ya no se tiene un flujo de dos fases altamente compresible.

Junto a dichas mediciones realizan una evaluación estadística a imágenes de la cavitación producida en los álabes, obtenidas con una cámara de alta velocidad. Cuando no se produce cavitación, la imagen permanece oscura; cuando sí ocurre, esta se ve de un color blanco, y la intensidad del color determina el grado de cavitación. Dentro del análisis de imágenes, que se observa en la Figura 4.7, se asume que el valor promedio del nivel de gris (μ) presente en las imágenes equivale a la fracción de vapor, y que la desviación estándar (s) del nivel de gris se relaciona con la dinámica de la cavitación (variación con respecto al tiempo del volumen de la nube cavitante).

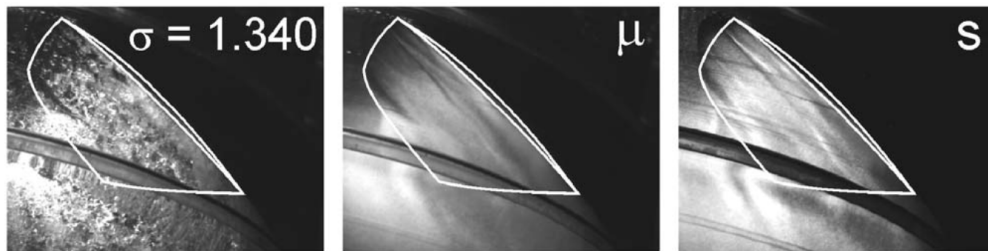


Figura 4.7: Imagen de la cavitación con $\sigma = 1,34$, junto al valor promedio del nivel de gris (μ) y a la desviación estándar (s) (Rus et al., 2007)

En la Figura 4.8 se observa cómo la presión estimada según el análisis estadístico de imágenes

tiene la misma tendencia que las mediciones acústicas. Se aprecia también cómo las ondas de presión que se producen en el borde de los álabes (tip) predominan.

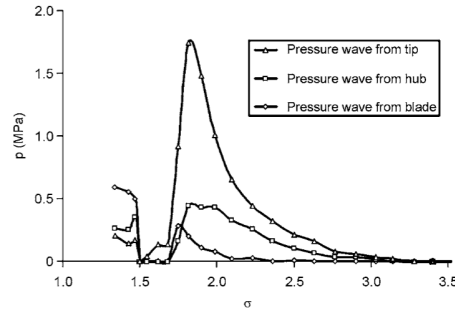


Figura 4.8: Onda de presión construida mediante el análisis estadístico de gris (Rus et al., 2007)

4.5. Instrumentos de medición acústica

A continuación, se detallan los instrumentos usados en experimentaciones anteriores; junto a la información característica de cada tipo, se menciona también las normas disponibles según corresponda. Todos, a excepción de los sonómetros, requieren un sistema de adquisición de datos.

4.5.1. Hidrófono

Corresponden a transductores de presión piezoeléctricos. El efecto piezoeléctrico se basa en la generación de una señal eléctrica cuando se aplica un esfuerzo mecánico (producido por la onda de presión acústica) sobre un material cristalino, cuya estructura cristalina no posee centro de simetría (Yan y Maurya, 2015). Estos instrumentos registran las ondas acústicas que viajan a través del agua.

Es el instrumento de medición acústica más usado en túneles de agua. Para poder usarlo en un tubo Venturi, se debe instalar en un contenedor con agua, el cual se monta sobre este, como se observa en la Figura 4.9. También se puede utilizar para registrar ondas de presión si se instala dentro del circuito (Petkovšek et al., 2020).

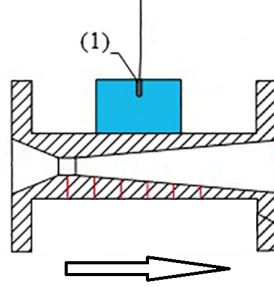


Figura 4.9: *Uso de un hidrófono (1) en un tubo Venturi (Xu et al., 2020)*

4.5.2. Sensor de emisión acústica

Al igual que los hidrófonos, funcionan con el efecto piezoeléctrico. Miden las ondas sonoras de alta frecuencia (mayores a 50 [kHz]) que se disipan a través de estructuras o componentes de maquinarias (Kistler, s.f.). Usualmente se usan acoplados a la estructura de turbinas hidráulicas y bombas, para registrar emisiones acústicas de cavitación.

4.5.3. Micrófono

Su funcionamiento se basa en el movimiento oscilatorio de un diafragma móvil separado de una placa fija, que generan las ondas de presión que se transmiten por el aire. Estos dos componentes crean un condensador, cuya capacitancia cambia con el movimiento del diafragma. El circuito capacitivo requiere un voltaje de polarización, por lo que existen dos tipos de micrófonos: los que vienen prepolarizados, que requieren una pequeña fuente de voltaje para el circuito capacitivo; y los que no lo están, los cuales necesitan una fuente de voltaje específica para funcionar correctamente (Audio-Technica, s.f.).

Las principales características que definen un micrófono son su sensibilidad y la respuesta de frecuencias. La sensibilidad de un micrófono se define como el valor de salida (en voltios) que genera una presión sonora de entrada, usualmente de una onda de 1 [Pa] de amplitud. La respuesta de frecuencias es el rango de frecuencias constitutivas de un sonido que el micrófono logra registrar, así como también la precisión con que se mide cada frecuencia.

Sonómetros

Es un instrumento diseñado para medir niveles sonoros de forma normalizada. Son instrumentos portátiles; están compuestos de un micrófono, un preamplificador, un procesador de señales y

una pantalla.

La norma IEC 61672-1:2013 define dos niveles de desempeño para sonómetros con respecto a la precisión de medición, clase 1 y clase 2. Para señales acústicas fluctuantes, el sonómetro cambia la forma en que procesa el sonido, mediante una ponderación temporal descrita en la misma norma. En la Figura 4.10 (a) se ve una ponderación rápida y lenta. En la norma, también, se establecen las ponderaciones de frecuencia (A, C y Z); estas les dan más importancia a algunas frecuencias más que a otras, como se observa en la Figura 4.10 (b).

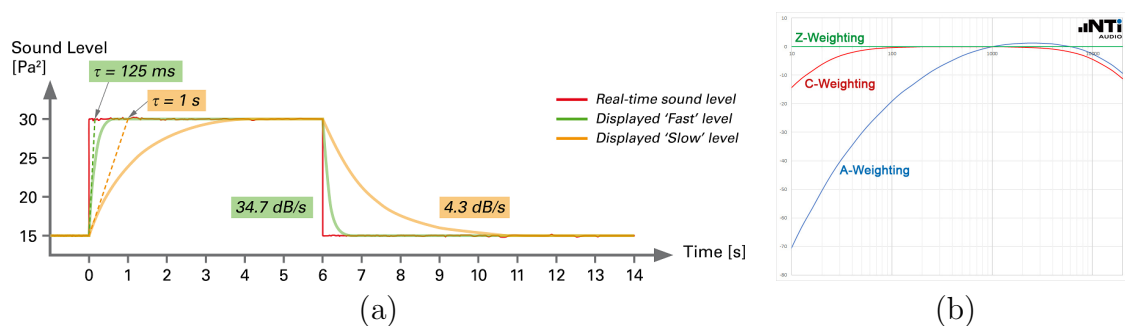


Figura 4.10: Ponderación temporal (a) y ponderación de frecuencias (b) (NTI Audio AG, sf)

Otra herramienta, comúnmente, incorporada en los sonómetros, es el análisis de frecuencias, el cual entrega información con respecto a las frecuencias contenidas en el sonido. Las dos formas más comunes son mediante filtros de octava y análisis FFT.

Sonda de intensidad acústica

Consisten en dos micrófonos separados espacialmente por una distancia fija. El principio de funcionamiento se basa en medir la intensidad del sonido, con el cual se puede obtener la potencia sonora. Los micrófonos obtienen información de la presión instantánea y del gradiente de presión del sonido. La intensidad del sonido se calcula a partir del promedio temporal de la presión del sonido multiplicado por la velocidad de las partículas (obtenida del gradiente de presión) (Brüel and Kjær, s.f.). Una ventaja de este instrumento es que no requiere un ambiente de medición específico (como puede ser una cámara anecoica¹).

¹Cámara diseñada para aislar el ruido proveniente del exterior y para eliminar las reflexiones de las ondas acústicas sobre las paredes en el interior de la cámara.

Capítulo 5

Metodología

En este capítulo se detallan los materiales, métodos y procedimientos necesarios para la realización del trabajo investigativo.

5.1. Equipamiento del banco de ensayo

El Laboratorio de Termo Hidráulica del campus San Joaquín dispone de un banco de ensayos para visualizar y estudiar la cavitación mediante un tubo Venturi de sección circular. El propósito del banco de ensayos es obtener la curva altura-caudal de una bomba centrífuga o de dos bombas en serie o en paralelo. Sin embargo, el circuito es modificado recientemente por Toro (2024) para diseñar e integrar en este un tubo Venturi.

El circuito es alimentado por agua proveniente de un estanque de aproximadamente 12 [m^3] abierto a la atmósfera, mediante una bomba centrífuga (solo una está operativa) a través de tuberías de acero galvanizado de 2 [*pulgadas*] de diámetro. En la Tabla 5.1 se describen las características de los componentes principales.

Tabla 5.1: *Composición del banco de ensayo*

Componente	Descripción
Bomba centrífuga Vogt H620	Caudal de 28 [m^3/h], altura de 30 [m], $\varnothing$ de 170 [mm] y 2 900 [rpm]
Motor	Potencia 5,5 [kW]
Válvula estranguladora Samson 3277	Accionamiento neumático con carrera lineal de 7,5 a 30 [mm]
Tuberías	Acero galvanizado ASMT-A53 Sch40 grado A con diámetro nominal de 50,8 [mm]
Codos, tees, tees mecánicas y uniones Xhtong	Diámetro de 2 [$pulgadas$] con presión de trabajo de 2,07 [MPa]
Válvulas de bola Giacomini R850	Diámetro de 2 [$pulgadas$], presión máxima 2,8 [MPa]
Variador de frecuencia Siemens Sinamics G120C PN	Potencia máxima de 5,5 [kW]

Se dispone de una cámara monocromática de escaneo progresivo JAI modelo CM-080GE. En la Tabla 5.2 se observan las características técnicas de esta.

Tabla 5.2: *Especificaciones técnicas de la cámara*

Característica	Descripción
Resolución	1 032 x 778 píxeles
Sensor	Monocromático de tamaño 1/3"
Velocidad de captura	30 fps a resolución completa
Tiempo de exposición	84 [μs] hasta 2 [s]
Interfaz de vídeo	GigE Vision con profundidad de color de 8 o 10 bits
Ganancia	-3 a 50 [dB]
Lente	Nikon AF Nikkor 50mm f/1.4D

5.1.1. Sensores

A continuación se describen los sensores que componen el banco de ensayo.

Tabla 5.3: *Sensores del banco de ensayo*

Sensor	Rango	Precisión	Salida analógica
Transmisor de presión relativa Danfoss MBS 1700	0-10 [bar]	1 % F.S. ($\pm 0,1$ [bar])	4-20 [mA]
Transmisor de presión relativa Wika S10	-1-15 [bar]	0,5 % span ($\pm 0,08$ [bar])	4-20 [mA]
Temperatura	0-80[°C]	-	4-20 [mA]
Caudal Siemens SINTRANS F M MAG 5100 W	0-10 [m/s]	0,5 % valor medido	

5.1.2. Tubo Venturi

En la Figura 5.1 se observa el plano del tubo Venturi diseñado por Toro (2024). Está construido en polimetilmetacrilato (PMMA), comúnmente llamado acrílico, lo que permite observar la cavitación sin dispersión de la luz, ya que el índice de refracción del PMMA es similar al del agua, 1,49 y 1,33 respectivamente. El ángulo de convergencia es de 45° y el de divergencia es de 20° . En el centro de la garganta del tubo se hizo un agujero para la obtención de la presión estática.

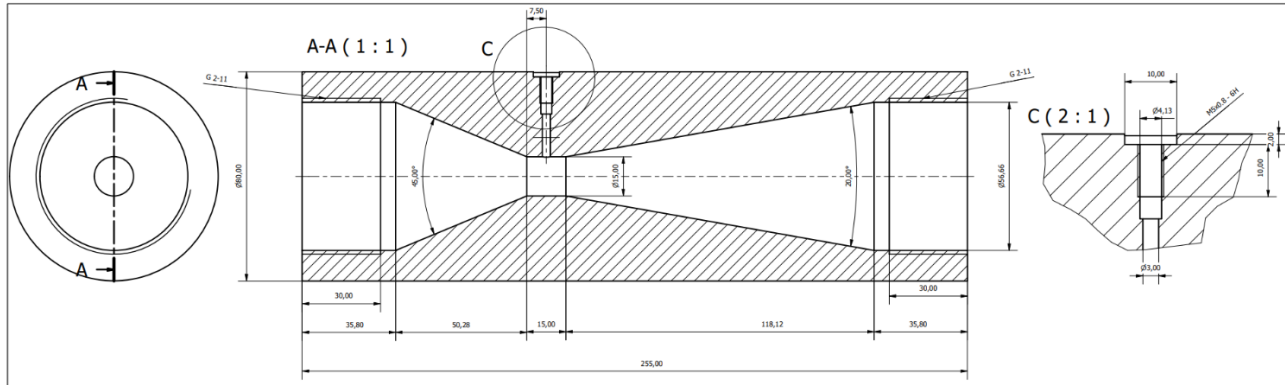


Figura 5.1: *Plano del tubo Venturi; las medidas están en milímetros (Toro, 2024)*

El tubo se conecta al banco de ensayos mediante dos conectores de PVC, los cuales unen ambos lados del tubo a una sección de cañería de acero, para luego, mediante una unión flexible ranurada, lograr la unión a las cañerías del banco de ensayo. Esto se hace con el propósito de evitar el contacto de acero - PMMA y también para que sea fácilmente desmontable (Toro, 2024).

5.1.3. Sistema de control y adquisición de datos

Está constituido por un controlador lógico programable (PLC) Simatic S7 1200 CPU 1215C, que permite automatizar y controlar el proceso, así como también adquirir y digitalizar señales

analógicas procedentes de sensores; una pantalla HMI (human machine interface) Siemens KTP700 Basic, que permite visualizar datos adquiridos y controlar el PLC; tres módulos de adquisición de datos SM 1231 AI, que tienen cada uno 4 entradas analógicas de 13 [bits]; dos fuentes de alimentación, una (Siemens PM 1207) para el PLC y otra (Siemens Sitop) para alimentar instrumentos.

El PLC permite controlar el flujo de agua en el circuito de dos formas, mediante el control de la válvula de estrangulación neumática y mediante el variador de frecuencias. El control del flujo se hace a través de la pantalla HMI, la que está comunicada con el PLC mediante un cable ethernet.

El sistema de adquisición de datos permite obtener el valor de las variables de presión, caudal y temperatura para mostrarlas en la pantalla HMI. Existen tres formas de exportar los datos, si se quiere trabajar con ellos. Las primeras dos opciones consideran el uso del programa TIA Portal, que permite conectar el PLC a un computador, en donde se puede modificar la programación de este junto con obtener en tiempo real lectura de señales. Este incluye la función Trace que permite graficar y exportar datos. La segunda opción es comunicar el PLC con LabVIEW mediante OPC Server.

La tercera opción es mediante un sistema de adquisición de datos externo al PLC. Bolovic (2019) usa el módulo LabJack U3 HV, el que posee 4 entradas analógicas con señales en el rango de (-10,3 - 10,3) [V], resolución de 12 [bits] y frecuencia de muestreo de 2,5 [ksamples/s].

5.1.4. Instrumento de medición acústica

El principal inconveniente de los instrumentos de medición acústica (a excepción del sonómetro) es que requieren un sistema de adquisición de datos (DAQ). Este debe cumplir con el teorema de Nyquist, en donde la frecuencia de muestreo condiciona el ancho de banda, para así lograr una correcta digitalización de la señal.

La mejor opción es adquirir un hidrófono o sensor de emisión acústica, ya que estos pueden medir frecuencias muy altas, por lo que se podrían realizar mediciones orientadas a las frecuencias más características de la cavitación. Adicional a la adquisición del sensor, se requiere un DAQ especializado para mediciones acústicas, según el rango de frecuencias que puede medir dicho sensor. El costo es alto y la gestión de compra requiere tiempo, sumado a la poca disponibilidad de este tipo de instrumentalización en el mercado nacional, hacen de esta una opción inviable. Los micrófonos de laboratorios también son una opción ideal, a pesar de que los rangos de frecuencia que miden son inferiores a los sensores antes mencionados (típicamente hasta 20 [kHz]).

Teniendo en cuenta el equipamiento actual, se podría usar el DAQ LabJack U3 HV; sin embargo, este no incorpora filtro anti-aliasing ni un sistema de amplificación, lo que puede ser problemático, ya que el rango de voltaje de adquisición de datos de la entrada analógica es superior al que entrega un micrófono, el cual va desde los $(0,56 - 50)$ $[mV]$ para una presión acústica RMS de $1 [Pa]$ (que equivale a $94 [dB]$ de SPL). Sumado a esto, los micrófonos requieren una fuente de voltaje o corriente (según el protocolo de alimentación) que tampoco incluye este DAQ.

Sonómetro

Considerando todo lo anterior, la mejor opción es adquirir y usar un sonómetro; son más prácticos que cualquier otro instrumento de medición acústica, ya que son portables y no requieren ningún componente adicional. Existen varios tipos de sonómetros limitados por las características que incluyen. Para realizar un análisis estadístico de imágenes, solo se requiere obtener el nivel de presión sonora. Si adicionalmente se quiere realizar un análisis espectral de frecuencia, se requiere un sonómetro que realice análisis de octavas o FFT.

Se adquiere un sonómetro HT Instruments modelo HTA102. En la Tabla 5.4 se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 5.4: *Especificaciones técnicas del sonómetro*

Característica	Descripción
Norma	IEC 61672-1 Tipo 2
Rango de medición	$30 - 130 [dB]$
Precisión	$\pm 1,4 [dB]$
Ponderación de frecuencia	A y C
Rango de frecuencia	$31,5 [Hz] - 8 [kHz]$
Ponderación temporal	Rápida ($125 [ms]$) y lenta ($1 [s]$)

5.2. Procedimiento experimental

Se registran 20 puntos de medición, con el motor de la bomba centrífuga funcionando desde los $1\ 500 - 1\ 800 [rpm]$ en intervalos de $100 [rpm]$, $1\ 850 - 2\ 450 [rpm]$ en intervalos de $50 [rpm]$ y $2\ 500 - 2\ 700 [rpm]$ en intervalos de $100 [rpm]$.

Para cada estado, se registra la presión a la entrada y salida del Venturi, el caudal, la temperatura del agua y las emisiones acústicas. Para cada punto de medición se registran al menos cinco valores de las distintas variables (presión, caudal y temperatura) para obtener un valor promedio.

Si bien no se dispone de un sensor de presión en la garganta, es posible estimar este valor mediante la ecuación de Bernoulli (Ecuación 5.1), aplicando esta entre la entrada y la garganta del tubo.

$$p_{th} = p_{in} + \frac{1}{2} \rho (v_{in}^2 - v_{th}^2) \quad (5.1)$$

El circuito experimental no tiene disponible un sensor de medición de oxígeno disuelto en el agua, por lo que se hace funcionar el sistema durante cinco a diez minutos para que el nivel de oxígeno disuelto se estabilice. Este procedimiento también es útil para que la temperatura del agua y de los distintos componentes del sistema sea uniforme.

5.3. Determinación de parámetros de cavitación

Se utiliza el número de cavitación (σ) según la Ecuación 3.2, para calcular la intensidad de la cavitación. Este se modifica cambiando el caudal de agua mediante el variador de frecuencia del motor eléctrico. Dentro de los valores de σ , se evalúa el estado (incipiente y grados de desarrollo) y se analizarán las estructuras de cavitación que se observen.

El valor de σ se calcula con la presión a la entrada o a la salida del tubo Venturi. La velocidad del agua en la garganta $\vec{v}_{th}$ se calcula según la Ecuación 5.3, en donde Q_{th} es el caudal de agua y d_{th} es el diámetro de la garganta (15 [mm]). Se utiliza el valor de la presión de vapor y de densidad del agua asumiendo una temperatura de 20°C.

$$Q_{th} = \vec{v}_{th} A_{th} \quad (5.2)$$

$$\vec{v}_{th} = \frac{4 Q_{th}}{\pi d_{th}^2} \quad (5.3)$$

5.4. Medición de la presión sonora

Se posiciona el sonómetro a una distancia fija de 10 [cm], debajo de la zona divergente del tubo, sin cambiarlo de posición durante las mediciones. Se usa la ponderación de frecuencia A, para no considerar las frecuencias menores a 1 [kHz], las cuales pueden provenir del motor y de la bomba centrífuga. Se usa una ponderación temporal rápida (125 [ms]). Se obtendrán alrededor de 130 mediciones con el programa SoundLink que provee la empresa fabricante del sonómetro. Con los valores registrados, se calcula el valor medio, valor máximo, valor mínimo y desviación estándar del nivel de presión sonora. El sonómetro no dispone de análisis de frecuencias, por lo que no es posible realizar un análisis espectral de frecuencias.

5.5. Obtención de imágenes de alta velocidad

Con la cámara es posible obtener imágenes no secuenciales. Existen tres parámetros principales a configurar: el tiempo de exposición o de obturación, la ganancia y la apertura del diafragma. Estos se deben configurar según la intensidad de la fuente de luz utilizada, de forma que se observe correctamente la cavitación, teniendo en cuenta que se debe usar el menor tiempo de exposición posible, ajustando el resto de las variables en función de este.

La apertura del diafragma tiene relación con la cantidad de luz que se deja entrar a través del lente. En este caso se requiere una apertura luminosa, ya que las fuentes de luz disponibles no son tan intensas.

El tiempo de exposición corresponde al tiempo en que el sensor capta luz; al ser pequeño, permite obtener imágenes de objetos a alta velocidad, que en este caso son las estructuras de la cavitación. Una desventaja es que la imagen se ve más oscura mientras más pequeño sea este valor.

La ganancia corresponde a la amplificación de la señal registrada por el sensor de la cámara. Al aumentar la ganancia, las imágenes obtenidas presentan ruido (granulado).

La cámara se configura en modo de operación continua, con una velocidad de adquisición de 15 fotogramas por segundo y una profundidad de 8 $[bits]$. Un tiempo de exposición de 84 $[\mu s]$, una apertura de $f/2,8$ y una ganancia de -3 $[dB]$.

Fuente de luz

Se requiere una fuente de luz que ilumine correctamente el tubo para que se logren ver las estructuras de la cavitación. Rus et al. (2007) iluminan frontalmente los alabes de la turbina con una luz estroboscópica, en donde, mientras mayor sea la fracción de vapor, más blancas se ven las estructuras de la cavitación. De una forma similar, Toro (2024) utiliza un láser de color verde ubicado arriba del tubo, para luego procesar las imágenes y convertirlas a blanco y negro. De forma contraria a los casos anteriores, Sayyaadi (2010) ilumina el tubo desde atrás; en este caso, las estructuras se ven de color negro-grisáceo y el agua líquida de color blanco.

Se dispone de una fuente de luz constante de aproximadamente 50 $[W]$ y del láser color verde usado por Toro (2024).

5.6. Análisis estadístico de imágenes

5.6.1. Determinación del nivel de gris

Una imagen capturada con resolución de 8 [bits] significa que cada uno de los 3 colores (rojo, verde y azul) que componen un píxel puede tomar 256 valores, ya que $2^8 = 256$. Para una imagen en blanco y negro, los 256 valores reflejan el nivel de luminosidad del píxel y equivalen al nivel de gris, en donde 0 indica menor nivel de luminosidad y 255 el máximo nivel (Rus et al., 2007), cuando se ilumina frontalmente el tubo. Sayyaadi (2010) realiza esta experimentación de forma contraria; en este caso, la máxima luminosidad se logra sin cavitación, y según el grado de desarrollo de esta, la imagen se oscurece cada vez más.

Para aislar la información procedente de la cavitación, se pueden normalizar las imágenes adquiridas ($I(n)$) con una imagen de referencia (I_0), obtenida cuando no se presenta cavitación. Esto se logra con la siguiente ecuación:

$$Imagen(n) = abs(I(n) - I_0) \quad (5.4)$$

Esta normalización de las imágenes hace similar el aplicar cualquiera de los dos métodos de obtención de imágenes antes mencionados. El nivel de luminosidad está definido con la diferencia con respecto a una referencia; por consiguiente, la cavitación se observa de color blanco en cualquiera de los dos casos. Esta es una ventaja a la hora de usar las ecuaciones descritas a continuación.

Para un píxel (i, j) de una $Imagen(n)$ de un total de N adquiridas, se define el valor de gris $A(i, j, n)$ como el equivalente a la intensidad lumínica. Se puede entender cada imagen como una matriz de $i \cdot j$ valores (Rus et al., 2007):

$$Imagen(n) = \begin{pmatrix} A(1, 1, n) & \cdots & A(i, 1, n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A(1, j, n) & \cdots & A(i, j, n) \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

El valor promedio $\mu(i, j)$ de N imágenes se define según la Ecuación 5.6. La desviación estándar $s(i, j)$ según la Ecuación 5.7.

$$\mu(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A(i, j, n) \quad (5.6)$$

$$s(i, j) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (A(i, j, n) - \mu(i, j))^2} \quad (5.7)$$

Con las Ecuaciones 5.6 y 5.7 se obtiene, en cada caso, una imagen que entrega la información de las N imágenes usadas. Se obtendrán 400 imágenes para cada estado, las que se procesan en Matlab para realizar el análisis antes descrito.

Determinación del número de imágenes a capturar

Rus et. (2007) adquieren 600 imágenes y descartan 100, las cuales presentan valores más alejados del promedio. Se decide realizar un análisis para determinar si el número de imágenes a capturar es adecuado. Para esto se calcula el valor promedio (Ecuación 5.6) para un número específico de imágenes (10 en este caso) y se suma la información de todos los píxeles constitutivos de la imagen obtenida del valor promedio. Este proceso se realiza para un número mayor de imágenes, aumentando 10 en cada caso, para así calcular la variación porcentual entre el promedio actual y el anterior. Con el paso establecido de aumento de imágenes a promediar, se gráfica la variación que se produce a medida que se aumenta el número de imágenes capturadas. El objetivo de este procedimiento es encontrar el número desde el cual no existe una gran variación al aumentar las imágenes capturadas, y determinar si 400 imágenes son suficientes.

5.6.2. Amplitud de la onda de presión

Este análisis se basa en el trabajo realizado por Rus et al. (2007) mencionado en la sección 4.4. La potencia de una onda de presión emitida en el proceso de condensación de una nube de cavitación se puede determinar según la Ecuación 5.8 (Fortes-Patella et al., 2004), en donde P es la potencia, p_∞ es la presión alrededor de las burbujas, p_v es la presión dentro de las burbujas y $\frac{dV}{dt}$ es la variación del volumen de la nube de cavitación con respecto al tiempo.

$$P = (p_\infty - p_v) \left(\frac{dV}{dt} \right) \quad (5.8)$$

La amplitud de la onda de presión producida por el colapso de una estructura cavitante es directamente proporcional a la potencia:

$$p_0 \propto \sqrt{P} \quad (5.9)$$

La desviación estándar puede ser usada para estimar la variación del volumen de la nube de cavitación. Por consiguiente, la expresión para la onda de presión (normalizada por el valor máximo) es:

$$p_0 = k \sqrt{(p_\infty - p_v) \sum_i \sum_j s(i, j)} = k_1 \frac{\sqrt{(p_\infty - p_v) \sum_i \sum_j s(i, j)}}{\left[\sqrt{(p_\infty - p_v) \sum_i \sum_j s(i, j)} \right]_{max}} \quad (5.10)$$

La presión fuera de las burbujas (p_∞) se asume cercana a la presión a la salida del tubo, ya que el ángulo de divergencia es suficientemente amplio como para que se logre una rápida recuperación de la presión (Li et al., 2019); por consiguiente, se asume $p_\infty \approx 0,5 \cdot p_{out}$.

El valor de k_1 representa la amplitud máxima de la onda de presión, ya que la Ecuación 5.10 está normalizada. Según las investigaciones de Brennen (2013), Shimada et al. (1999) y Hofmann (2001), reportado por Rus et al. (2007), el valor de k_1 es aproximadamente 6 [Mpa].

5.6.3. Atenuación de la onda de presión

La viscosidad del fluido disipa la energía de la onda de presión. La onda atraviesa un flujo bifásico (agua-vapor) altamente compresible y agua en estado líquido, antes de llegar al instrumento de medición acústica. Para un material o medio específico con un espesor x , la presión p_0 se atenúa según la siguiente expresión (Rus et al., 2007):

$$p = p_0 e^{-(2/3)(\omega^2/\rho c^3)\eta x} \quad (5.11)$$

En donde ω es la frecuencia de la onda de presión, ρ es la densidad, c es la velocidad del sonido y η es la viscosidad. Los valores de ρ , η y c dependen del medio: agua líquida o agua-vapor (según una fracción volumétrica de vapor α). Por consiguiente, para calcular las propiedades del flujo bifásico se requiere estimar el valor de α .

Hofmann (2001) obtiene una frecuencia de 750 [kHz] para la onda de presión producida por el colapso de nubes en un hydrofoil; según reporta (Dular et al., 2006), Rus et al. (2007) usan $f = 500$ [kHz] para el colapso sobre los alabes de una turbina. Experimentaciones recientes obtienen frecuencias aproximadas de 260 [kHz] en una contracción tipo cuña en un túnel de agua (Wang et al., 2017).

5.6.4. Fracción de vapor y propiedades del fluido

Para la obtención de la ecuación de atenuación de la onda de presión se requiere conocer la velocidad del sonido en el medio, la densidad y la viscosidad. Para agua en estado líquido, se requiere conocer estas propiedades según la temperatura del agua. Para un flujo bifásico se requiere

un análisis más complejo, ya que se necesita la fracción de vapor α . Esta se estima a partir del valor promedio del nivel de gris, normalizado con el valor máximo:

$$\alpha = k \sum_i \sum_j \mu(i, j) = k_2 \frac{\sum_i \sum_j \mu(i, j)}{\left[\sum_i \sum_j \mu(i, j) \right]_{max}} \quad (5.12)$$

El valor de k_2 se relaciona con el valor máximo de la fracción de vapor, la que depende del tipo de cavitación. Rus et al. (2007) obtienen, mediante iteración, 0,3 para la cavitación en la punta y en el eje del álabe, y 0,978 para la cavitación en el centro del álabe. Esto se debe a que la cavitación de burbujas y nubes no presenta una fracción de vapor grande; sin embargo, en el centro del álabe se produce supercavitación. Stutz y Reboud (2000) obtienen un valor máximo de 0,25 para desprendimientos de nubes de cavitación en un tubo Venturi, similar al valor obtenido por Rus et al. (2007). Jahangir et al. (2019) miden la fracción de vapor en un tubo Venturi mediante la técnica de densitometría de rayos X y obtienen un valor local máximo de 0,86 y un valor medio de 0,2 para cavitación por nubes en un tubo Venturi muy similar al del banco de ensayos que se utiliza en este trabajo investigativo.

Según Brennen (2013), la velocidad del sonido c se puede calcular según la Ecuación 5.13, en donde los subíndices l y g se refieren a líquido y a gas respectivamente, κ es el coeficiente politrópico del gas y c_l es la velocidad del sonido en el agua.

$$c = \left[(\rho_l(1 - \alpha) + \rho_g\alpha) \left(\frac{\alpha}{\kappa p_\infty} + \frac{1 - \alpha}{\rho_l c_l^2} \right) \right]^{(-1/2)} \quad (5.13)$$

La densidad y viscosidad para un flujo bifásico se calculan respectivamente según:

$$\rho = \alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_l \quad (5.14)$$

$$\eta = \alpha\eta_g + (1 - \alpha)\eta_l \quad (5.15)$$

En la Tabla 5.5 se muestran las propiedades físicas de agua y del vapor de agua, a una temperatura de $20^\circ C$, requeridas para la obtención de las propiedades físicas de un flujo bifásico con una fracción de vapor α .

Tabla 5.5: *Propiedades físicas del agua líquida y del vapor de agua a $20^\circ C$*

Propiedades físicas	Agua líquida	Vapor de agua
Densidad [kg/m^3]	998	0,01732
Viscosidad [Ns/m^2]	$1,003 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
Velocidad del sonido [m/s]	1 482	-

5.6.5. Expresión para la onda de presión

Una vez obtenidos los valores de las propiedades del medio, se procede a calcular la expresión de la onda de presión atenuada:

$$p = p_0 (e^{-(2/3)(\omega^2/\rho c^3)\eta x})_{fb} (e^{-(2/3)(\omega^2/\rho c^3)\eta x})_l \quad (5.16)$$

En donde el valor de x corresponde a la distancia que atraviesa la onda de presión según el medio indicado en el subíndice.

Espesor flujo bifásico

El valor de x en la componente del flujo bifásico de la Ecuación 5.16 corresponde a la distancia desde el centro de la nube de cavitación hasta que esta termina. En la Ecuación 5.17 se observa la forma de obtener este valor, el cual depende de la distancia más la fracción de vapor del flujo bifásico.

$$x_{fb} = k \sum_i \sum_j \mu(i, j) = k_3 \frac{\sum_i \sum_j \mu(i, j)}{\left[\sum_i \sum_j \mu(i, j) \right]_{max}} \quad (5.17)$$

La constante k_3 se relaciona con el espesor de la estructura de cavitación que la onda de presión tiene que atravesar, la cual se puede medir directamente de las imágenes adquiridas. También es posible obtener este valor del promedio del nivel de gris, ya que cada nube es ligeramente diferente; el valor medio de todas es una buena aproximación al tamaño. La distancia recorrida por la onda de presión corresponde a la mitad de esta distancia.

La distancia entre el término de la nube de cavitación y el tubo corresponde al componente de agua líquida en la Ecuación 5.16.

Capítulo 6

Resultados

A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos. Primeramente, se determina la forma más adecuada de caracterizar la cavitación. En la siguiente sección se analizan las estructuras cavitantes presentes en el fluido según el número de cavitación (σ). Seguidamente se analizan los efectos que la cavitación produce, con el propósito de encontrar tendencias o comportamientos singulares. Luego se entregan los resultados referentes al análisis del nivel gris. Finalmente, se estima la onda de presión y su atenuación.

6.1. Caracterización de la cavitación

Como se menciona en la sección 5.3, se usa el número de cavitación (σ) para caracterizar el estado de la cavitación, según la Ecuación 3.2. La presión de referencia más adecuada de utilizar es la presión estática a la entrada del tubo Venturi (p_{in}), ya que esta no está influenciada por las pérdidas hidráulicas provocadas por la constricción del Venturi ni por las producidas por la cavitación. Por consiguiente, es una referencia más estable; sin embargo, a partir de las 2 050 [rpm], el valor de σ se vuelve constante con un valor aproximado de $\sigma \approx 1,21$, como se observa en la Figura 6.1 (a).

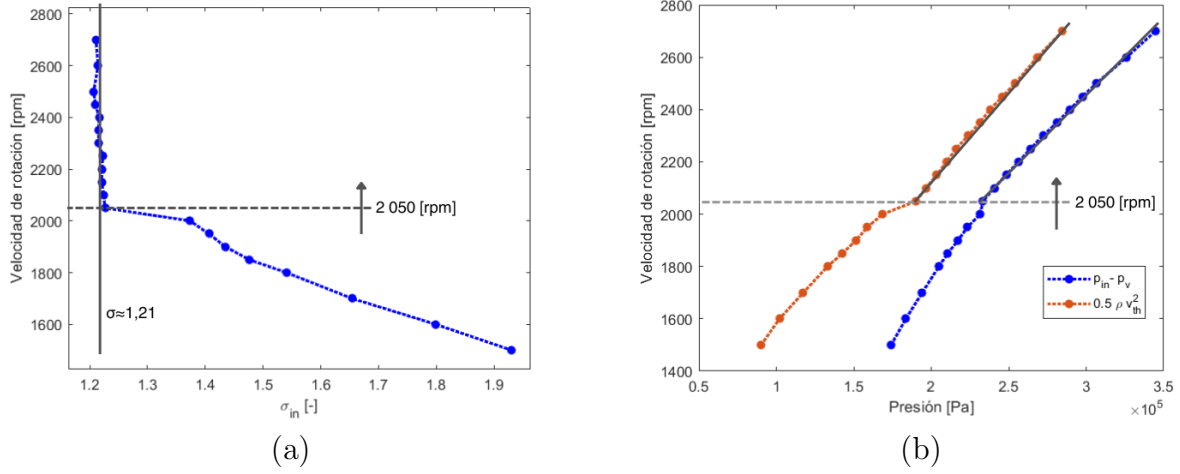


Figura 6.1: Número de cavitación usando como referencia la presión a la entrada del tubo (a) y componentes del número de cavitación (b), ambos con respecto a la velocidad de rotación de la bomba

Esto se debe a que la diferencia de la presión estática ($p_{in} - p_v$) y la presión dinámica en la garganta ($0,5 \rho v_{th}^2$) tienen la misma tendencia de crecimiento a partir de las 2 050 [rpm], como se observa en la Figura 6.1 (b). Esto no es adecuado, ya que el propósito de σ es entregar el estado de desarrollo y la intensidad de la cavitación. Esto no ocurre si σ se vuelve constante, ya que existe un incremento en la intensidad de la cavitación desde las 2 050 [rpm] en adelante. Por lo que se decide usar como presión de referencia la presión estática a la salida del tubo Venturi (p_{out}).

El valor de σ aumenta de forma constante a medida que aumenta el número de revoluciones. Sin embargo, la pendiente de la curva cambia y crece a partir de las 2 050 [rpm] y $\sigma = 0,91$, como se observa en la Figura 6.2. Esto se relaciona con un cambio abrupto en las dinámicas de la cavitación, que se analiza en la sección siguiente; y con el efecto que la cavitación tiene sobre la presión estática y el caudal.

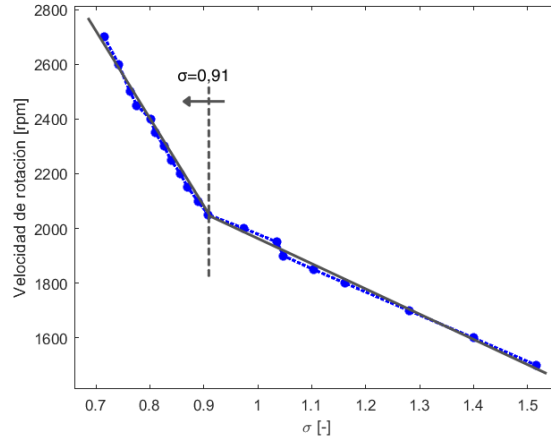


Figura 6.2: *Relación entre el número de cavitación y la velocidad de rotación de la bomba centrífuga*

6.2. Dinámicas de la cavitación

En los tres primeros puntos de medición, que corresponden a σ igual a 1,52, 1,40 y 1,28, no se presentan burbujas. En la Figura 6.3 se observa el tubo sin cavitación, imagen que también es usada como referencia para realizar el análisis del nivel de gris.



Figura 6.3: *Imagen de referencia (sin cavitación) cuando $\sigma = 1,40$*

Cuando el número de cavitación disminuye hasta 1,16, aparece y desaparece un delgado anillo de burbujas en el inicio de la garganta del tubo; por consiguiente, en este punto se tiene cavitación incipiente. El anillo aumenta su longitud ligeramente y su presencia se vuelve casi constante cuando se llega a $\sigma = 1,04$; sin embargo, sigue oscilando longitudinalmente. Ocasionalmente, aparece una cantidad muy pequeña de burbujas hacia el final de la garganta, que también oscila, como se observa en la Figura 6.4 (b). Cuando σ disminuye hasta 0,97, el anillo aumenta aún más su

longitud, hasta casi la mitad de la longitud de la garganta. La oscilación en la longitud del anillo de burbujas siempre está presente. En la Figura 6.4 se observan imágenes capturadas para dos valores de σ .

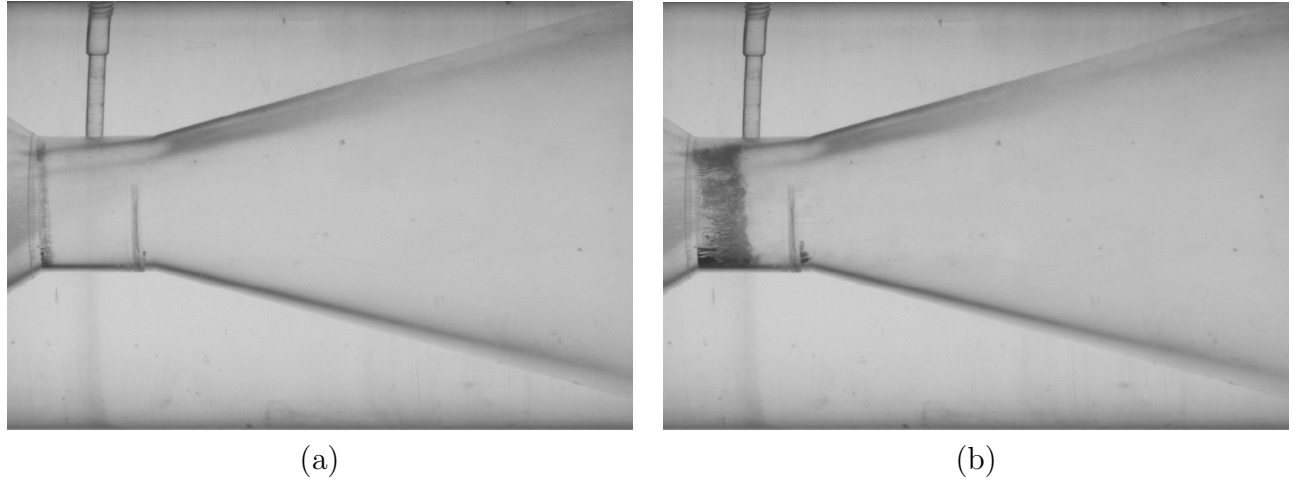


Figura 6.4: *Cavitación con $\sigma = 1,16$ (a) y $\sigma = 0,97$ (b)*

Con $\sigma = 0,91$ se produce un aumento significativo y abrupto en el anillo, el cual crece sobre toda la garganta, en lo que pareciera ser un desprendimiento de la capa límite. En este caso, se desprende parte de la estructura de la cavitación adherida, la cual se condensa de forma casi inmediata al salir de la garganta, probablemente por la rápida recuperación de la presión en el tubo Venturi. El comportamiento es similar hasta $\sigma = 0,86$, solo que aumenta la longitud de la cavitación adherida y se observan más frecuentemente estructuras no coherentes desprendidas, como la que se observa en la Figura 6.5 (b).

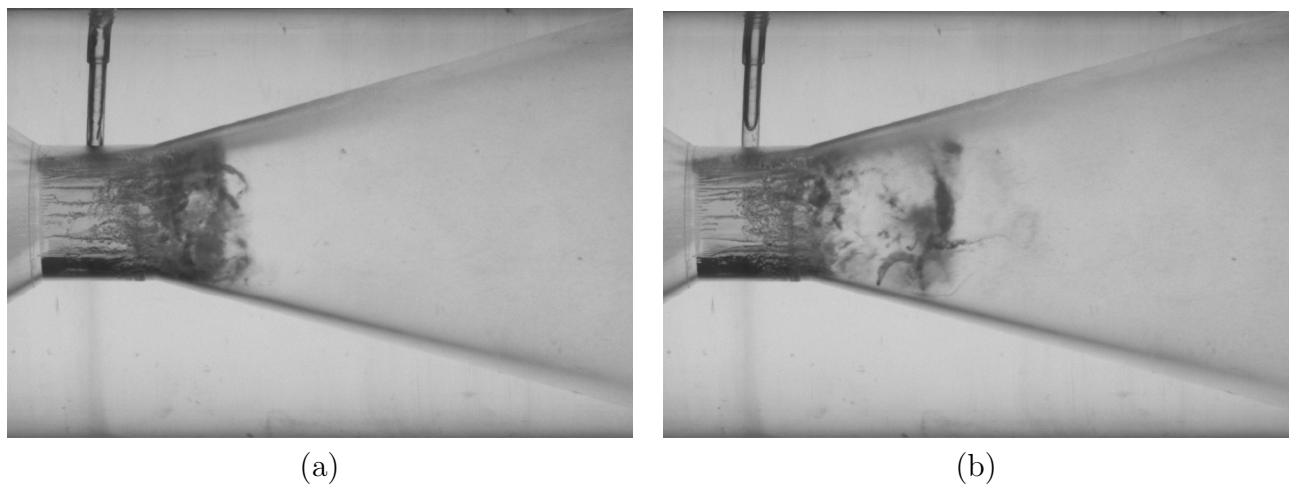


Figura 6.5: *Cavitación con $\sigma = 0,91$*

Cuando $\sigma = 0,84$, se logra visualizar estructuras coherentes que se desprenden y avanzan una pequeña distancia antes de que se condensen. Estas estructuras tienen una forma toroidal que, al avanzar, se expande alcanzando una forma similar a una nube. La zona de condensación en este caso es de alrededor de 3 [cm] terminada la garganta. En algunas imágenes, aún se ven estructuras no coherentes como las descritas anteriormente.

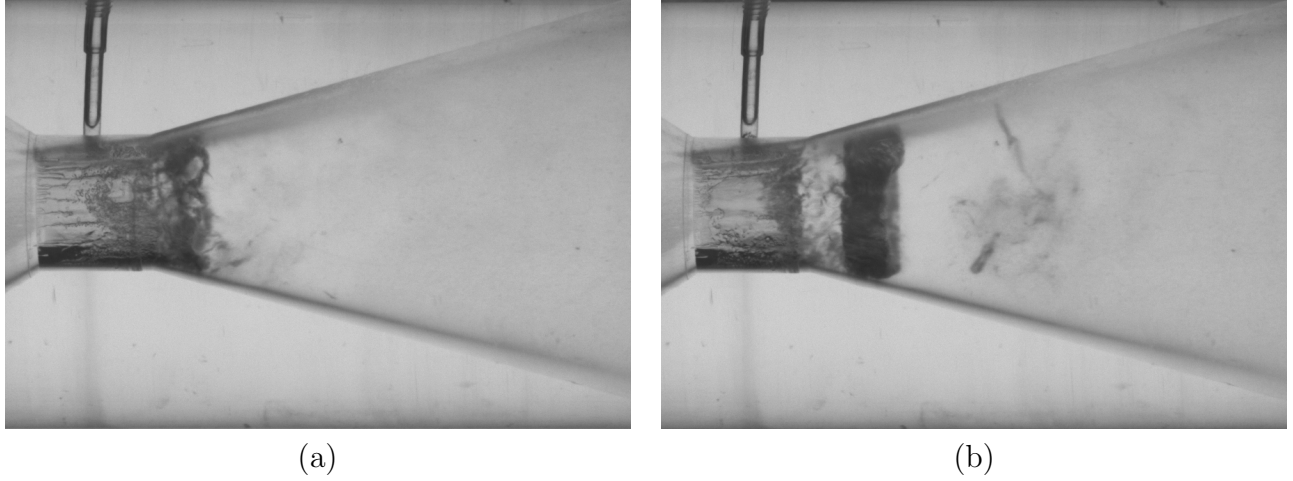
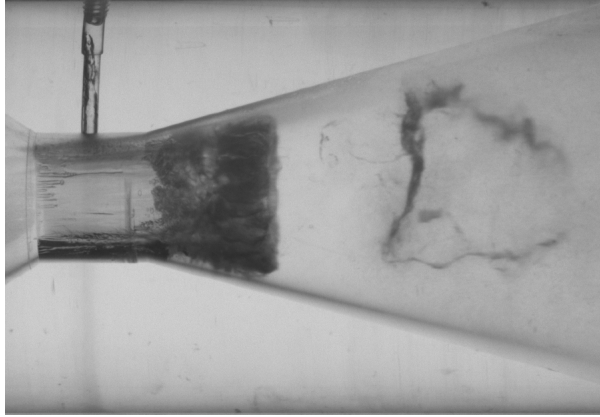


Figura 6.6: *Cavitación con $\sigma = 0,84$*

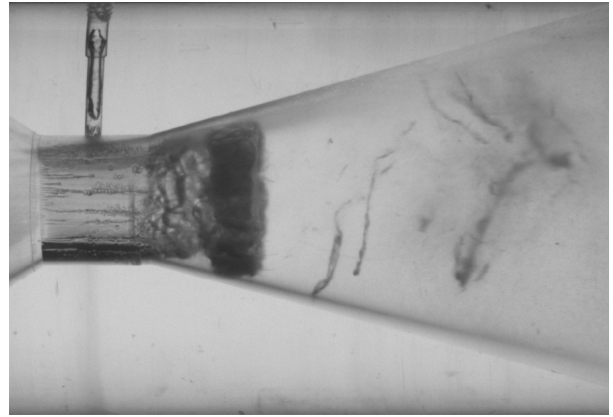
En el punto de medición subsiguiente, $\sigma = 0,81$, se observa que la cavitación está caracterizada por desprendimientos coherentes de estructuras toroidales. Esta dinámica también se aprecia en el resto de los puntos de medición ($\sigma = 0,81$ hasta $\sigma = 0,72$). La cavitación adherida sobre la garganta siempre está presente; la cavidad que se forma en la parte divergente del tubo es la que se desprende.

A medida que disminuye σ , aumenta ligeramente la distancia a la que colapsan las nubes y también el tamaño de estas. El largo de la cavitación adherida no es tan diferente desde $\sigma = 0,84$ hasta $\sigma = 0,72$. La frecuencia de desprendimiento pareciera disminuir a medida que disminuye σ ; sin embargo, se requiere obtener imágenes consecutivas para estudiar a fondo el proceso de desprendimiento.

En la Figura 6.7 (a) se observa la cavidad adherida previo a un desprendimiento; también se nota una estructura residual en la zona de colapso, que indica que una nube acaba de condensarse. En la Figura 6.7 (b) se observa un anillo que se está desprendiendo, y que se expande y toma una forma de nube (Figura 6.7 (c)). Por último, en la Figura 6.7 (d) se ve una nube en proceso de condensación. Estas imágenes no son consecutivas, solo pretenden entregar información de la dinámica de desprendimiento que se observa en la mayoría de las fotografías.



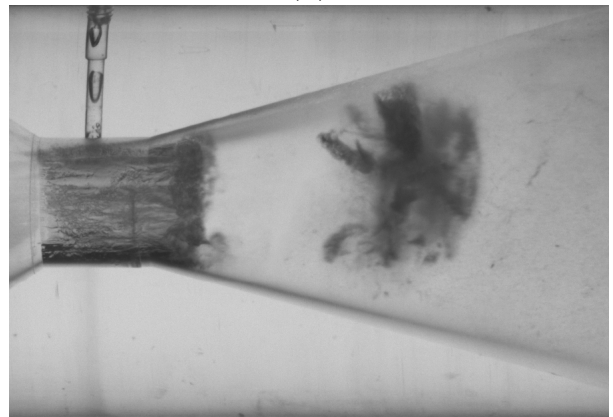
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.7: *Imágenes no consecutivas de la cavitación con $\sigma = 0,72$*

En la Figura 6.8, al igual que en varias imágenes, como por ejemplo en la Figura 6.6 (a) o 6.7 (a), se observa lo que parecen ser chorros reentrantes por debajo de la cavitación adherida que se encuentra sobre la zona divergente del tubo. Este se caracteriza por ser un chorro de una mezcla de agua y vapor con aspecto espumoso.

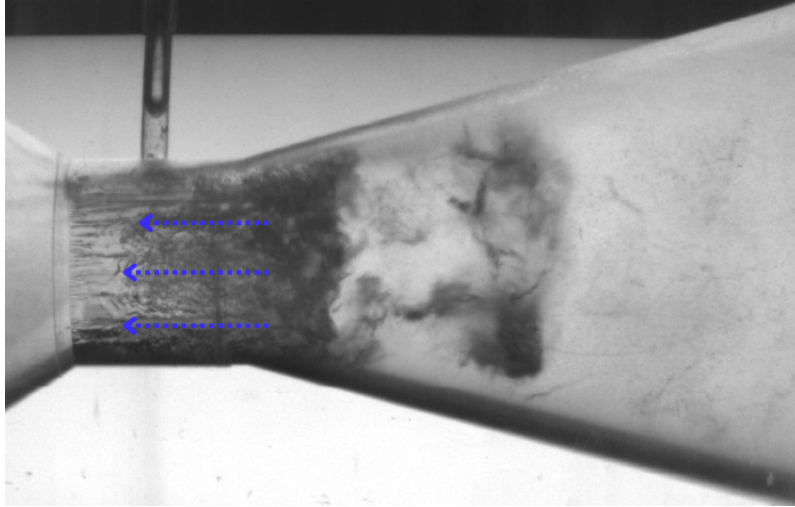


Figura 6.8: *Chorro reentrante*

6.3. Efectos de la cavitación

La formación de cavidades de vapor genera una serie de efectos en el flujo. A medida que aumenta el grado e intensidad de la cavitación, se produce una mayor caída de presión entre la entrada y salida del tubo, una influencia sobre el caudal que pasa por el tubo y aumentan considerablemente las emisiones acústicas. A continuación, se analiza la influencia de la cavitación sobre estos parámetros. En el Apéndice A se reportan las mediciones de los parámetros mencionados.

6.3.1. Caudal

Cuando se analiza el caudal de agua con respecto al número de cavitación, se observa un mayor aumento en el caudal en el mismo punto mencionado anteriormente ($2\,050\text{ [rpm]}$ y $\sigma = 0,91$), en donde aumenta un 6 %, con respecto al punto de medición anterior ($2\,000\text{ [rpm]}$ y $\sigma = 0,97$), según se observa en la Figura 6.9 (a). Esto también explica el aumento en el número de cavitación entre ambos puntos de medición, ya que al aumentar el caudal, aumenta también la velocidad del agua.

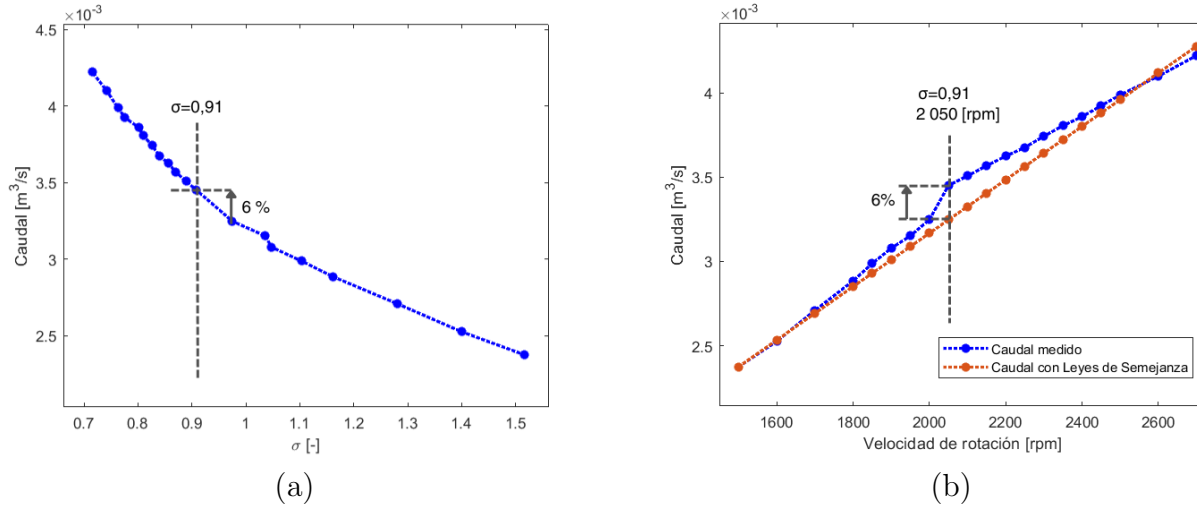


Figura 6.9: Efecto de la cavitación sobre el caudal de agua

En la Figura 6.9 (b) se observa el aumento del caudal por sobre el caudal teórico, obtenido con las leyes de semejanza de las bombas, aplicando la relación $Q_1/Q_2 = N_1/N_2$, entre el punto inicial ($N_1 = 1\,500\text{ [rpm]}$ y caudal de $0,00238\text{ [m}^3/\text{s}]$) y el punto final ($N_2 = 2\,700\text{ [rpm]}$). Cuando no se produce cavitación, ambas curvas son muy similares; cuando aparece cavitación incipiente ($1\,800\text{ [rpm]}$), estas empiezan a separarse. La mayor diferencia con respecto al caudal teórico se produce una vez que la cavitación adherida cubre completamente la garganta ($2\,050\text{ [rpm]}$ y $\sigma = 0,91$); dicha diferencia es de 6 %, luego disminuye gradualmente hasta que la diferencia es despreciable a la velocidad de $2\,600\text{ [rpm]}$. Sin embargo, en el último punto de medición se vuelve a observar una separación entre las curvas.

6.3.2. Presión

La presión estática a la entrada y salida del tubo aumenta a medida que aumenta la intensidad de la cavitación; sin embargo, no se comportan de la misma forma. A partir de $\sigma = 0,91$, aumenta considerablemente la presión a la entrada a medida que disminuye σ ; la presión a la salida, en cambio, no varía tan significativamente, como se observa en la Figura 6.10 (a). Esto se debe a las estructuras de la cavitación y de las pérdidas hidráulicas en la garganta del tubo. En la figura también se gráfica la caída de presión (Δp) producida entre la entrada y la salida del tubo, en donde se observa claramente el efecto de la cavitación y de las pérdidas hidráulicas sobre el sistema a partir de $\sigma = 0,91$, punto desde el cual cambia abruptamente la pendiente de la curva.

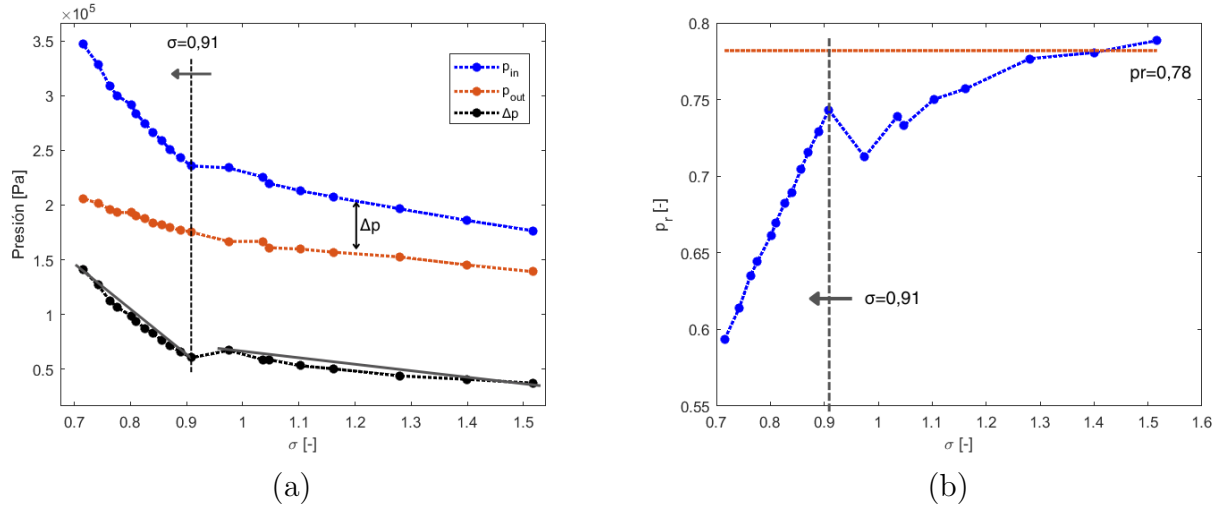


Figura 6.10: Presión estática a la entrada y salida del Venturi (a) y relación de presiones (b), ambas con respecto al número de cavitación

En la Figura 6.10 (b) se observa el comportamiento de la relación de presiones (p_r) con respecto al número de cavitación. El valor de p_r debiera ser constante ($p_r \approx 0,78$); sin embargo, cuando se produce cavitación incipiente ($\sigma = 1,16$), se observa como la curva empieza a cambiar debido a un aumento en la caída de presión. Cuando $\sigma = 0,91$, se produce un cambio abrupto en p_r , disminuyendo de forma lineal. Como se menciona en la sección 4.2, algunos trabajos experimentales usan a p_r para caracterizar la intensidad de la cavitación. Esto parece ser posible; sin embargo, p_r no considera el efecto de la temperatura ni del caudal de agua.

Presión en la garganta del tubo

Según se menciona en la sección 5.2 y según la Ecuación 5.1, es posible estimar la presión en la garganta del tubo (p_{th}), la cual se muestra en la Figura 6.11. Se observa una disminución abrupta de la presión estática en la garganta, una vez que la cavitación cubre completamente la garganta, en donde disminuye 20 [kPa] entre $\sigma = 0,97$ y $\sigma = 0,91$. Sin embargo, lo más notorio es que, una vez iniciada la cavitación y sin importar la intensidad de esta, la presión estática es muy superior (47 - 65 [kPa]) a la presión de vapor (2,34 [kPa] a 20 °C). Si bien esto parece no tener sentido físico, puede ser posible ya que la cavitación adherida en la garganta corresponde a una capa delgada de burbujas sobre la pared del tubo. Si la presión estática disminuye hasta p_v en dicha zona, implicaría que toda el agua que atraviesa la garganta cambiaría de fase, lo que no se observa en las imágenes obtenidas.

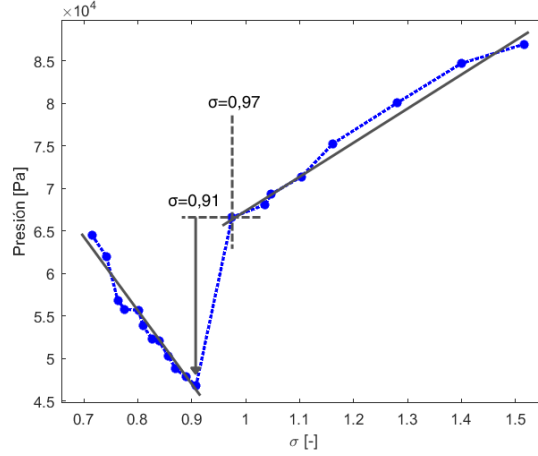


Figura 6.11: Presión estática en la garganta obtenida mediante la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la garganta del tubo

6.3.3. Emisiones acústicas

Según se menciona en la sección 5.4, se realizan 130 mediciones del nivel de presión sonora, con un paso entre mediciones de 0,2 [s] y con un tiempo total de medición de aproximadamente 26 [s], para cada uno de los 20 puntos de medición. Con esta información se obtiene el valor medio, así como también el valor mínimo, máximo y la desviación estándar de las emisiones acústicas.

En la Figura 6.12 (a) se observa el nivel de presión sonora (relación logarítmica entre la presión acústica y un valor de referencia) con respecto a σ . En los puntos de medición sin cavitación o cuando esta aún no cubre la garganta, la intensidad del ruido emitido es similar, $\approx 66,7$ [dB] entre $\sigma = 1,52$ y $\sigma = 0,97$. Coincidiendo con las observaciones de los parámetros anteriores, cuando $\sigma = 0,91$ se produce un cambio en el comportamiento de las emisiones acústicas, en donde aumentan 8 [dB] entre los puntos consecutivos de $\sigma = 0,97$ y $\sigma = 0,91$. Desde $\sigma = 0,91$ hasta el último punto de medición, se produce un aumento significativo en el ruido, con un aumento total de 17,5 [dB].

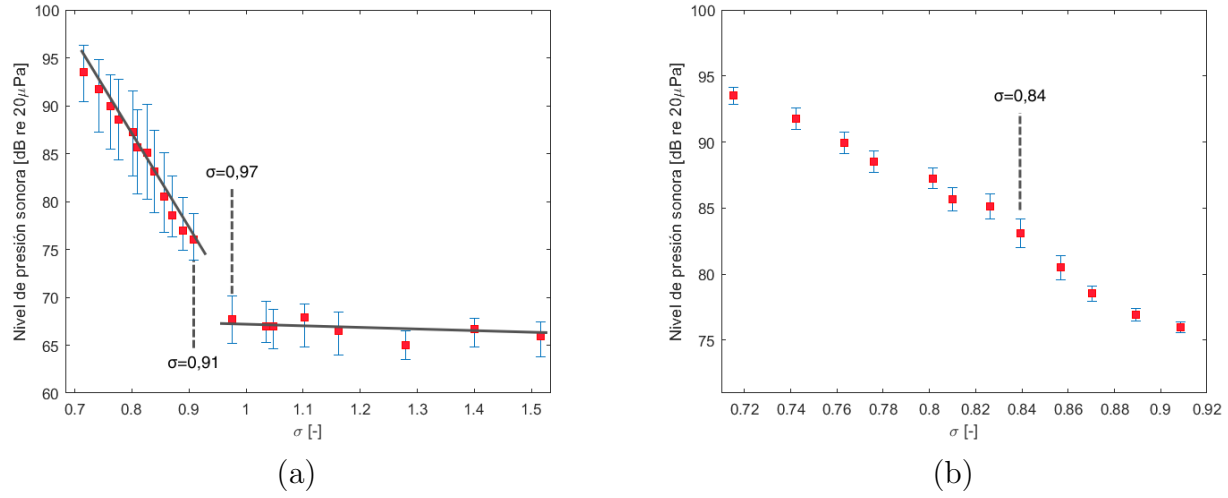


Figura 6.12: Nivel de presión sonora promedio, mínimo y máximo (a), nivel de presión sonora y desviación estándar desde $\sigma = 0,91$ o menor (b), ambos con respecto al número de cavitación

En la Figura 6.12 (b) se observa la desviación estándar del nivel de presión sonora, pero solo desde $\sigma = 0,91$ hasta $\sigma = 0,72$, ya que el valor es bajo (0,6 a 0,8 [dB]) en el resto de puntos de medición. Se observa que la desviación estándar es pequeña, lo que indica poca dispersión de los datos. La desviación estándar máxima que se alcanza es de 2,1 [dB] y se produce cuando $\sigma = 0,84$.

Otro aspecto a destacar es el rango entre el valor mínimo y máximo que alcanzan las emisiones acústicas pasado el valor de $\sigma = 0,91$, en donde aumenta considerablemente, como se puede observar en la Figura 6.13. También se observa que el rango es mayor cuando $\sigma = 0,83$. Al disminuir σ , se produce un sonido cada vez más intenso, producido por la condensación de estructuras de la cavitación. El punto de medición en que comienza el desprendimiento de estructuras coherentes es $\sigma = 0,84$; en donde también se observan desprendimientos de grupos pequeños de burbujas. Esto explica por qué en dicho punto se produce la mayor diferencia entre el valor mínimo y máximo. Cuando σ disminuye aún más, también lo hace el rango entre el valor mínimo y máximo, probablemente por un comportamiento más consistente en la dinámica de desprendimientos de nubes de cavitación.

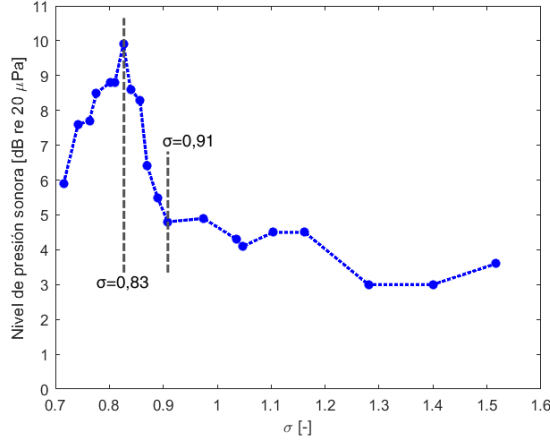


Figura 6.13: *Rango entre las emisiones acústicas mínimas y máximas con respecto al número de cavitación*

Con el instrumento de medición acústica disponible, se puede conocer la intensidad de la cavitación, ya que esta es proporcional al nivel de presión sonora. También es posible determinar cuando empiezan los desprendimientos de nubes, ya que en dicho punto se produce el mayor rango entre el valor mínimo y máximo del nivel de presión sonora, y también es mayor el valor de la desviación estándar.

6.4. Análisis del nivel de gris

El análisis de gris se realiza con base en 400 imágenes, utilizando la Ecuación 5.6 para obtener el valor promedio del nivel de gris (μ) y la Ecuación 5.7 para obtener la desviación estándar del nivel de gris (s).

Se usa una fuente de luz ubicada detrás del tubo, ya que es la opción más adecuada para iluminar correctamente las estructuras de la cavitación. Para aislar la información de la cavitación, se normaliza cada imagen con una imagen de referencia (sin cavitación), según la Ecuación 5.4. Se define una región de interés (ROI) que delimita el tubo, para así eliminar cualquier información fuera de este; para esto se utiliza la función `roipoly` en Matlab. En las 400 imágenes, de los 20 puntos de medición se usa la misma imagen de referencia y el mismo ROI, ya que la cámara se usa con la misma configuración (descrita en la Sección 5.5) y se ubica en la misma posición. En el Apéndice B se encuentra el código de Matlab utilizado para realizar el análisis de gris.

En la Figura 6.14 (a) se muestra el valor promedio del nivel de gris para $\sigma = 0,91$, el cual se normaliza con la imagen de referencia en (b). En (c) se observa el ROI utilizado en este análisis y

en (d) se muestra el valor promedio una vez aplicado el ROI.

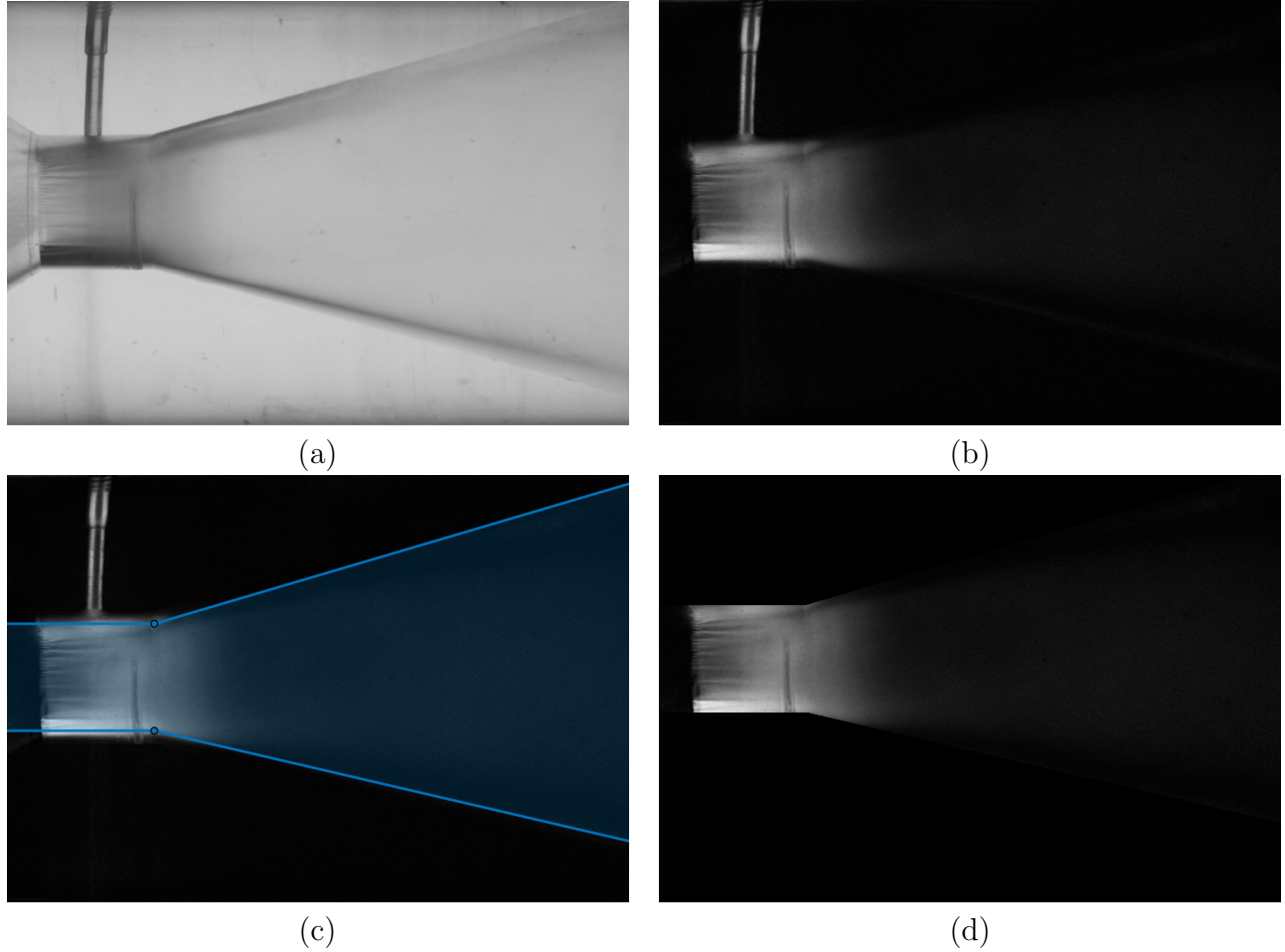


Figura 6.14: Valor promedio para $\sigma = 0,91$ (a), normalizado con una imagen de referencia (b), a la que se le aplica el ROI mostrado en (c). En (d) se observa el valor promedio luego de ambos procesos

Dentro del tubo se presenta un pequeño segmento libre de teflón que se libera del sello entre el tubo y el acople de PVC. Este, al moverse, aporta información al análisis del nivel de gris. Para eliminar esta variable, se decide restar el valor mínimo del valor promedio y de la desviación estándar a los 20 puntos de medición, al momento de obtener los valores sumados del valor promedio ($\sum_i \sum_j \mu(i, j)$) y de la desviación estándar ($\sum_i \sum_j s(i, j)$). El valor mínimo corresponde al caso en donde no se presenta cavitación. En la Figura 6.15 se observa la influencia del segmento libre de teflón sobre la desviación estándar.

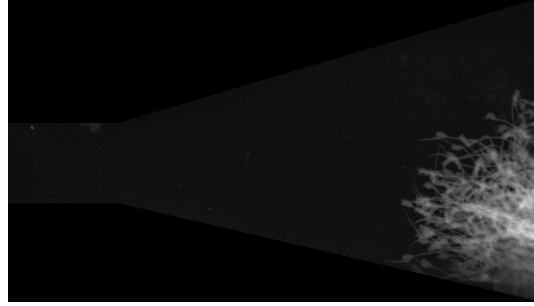
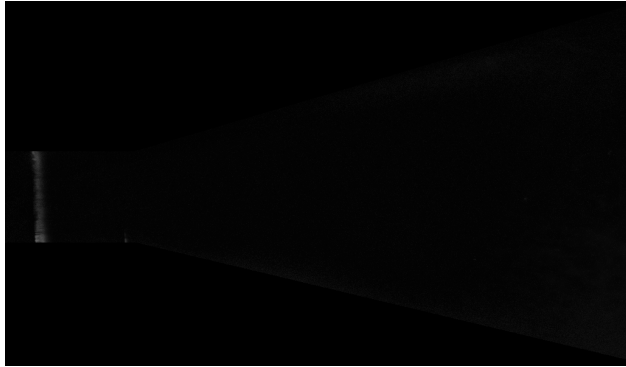


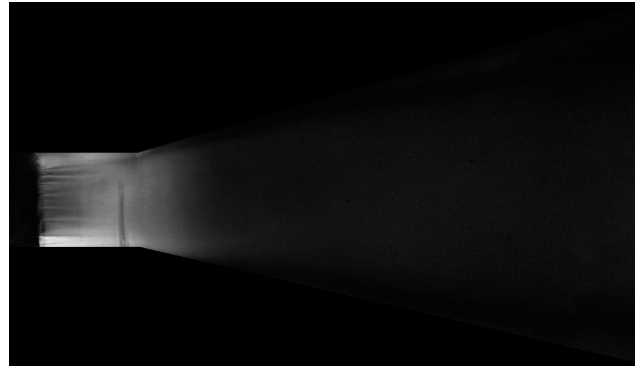
Figura 6.15: *Efecto del segmento libre de teflón sobre la desviación estándar para $\sigma = 1,52$*

6.4.1. Valor promedio del nivel de gris

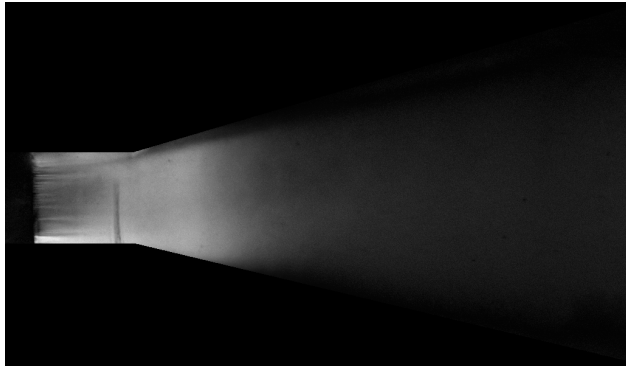
A continuación, se observan ejemplos del valor promedio del nivel de gris para cuatro puntos de medición diferentes.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.16: *Valor promedio del nivel de gris para $\sigma = 1,05$ (a), $\sigma = 0,91$ (b), $\sigma = 0,81$ (c) y $\sigma = 0,72$ (d)*

La información sumada del valor promedio de los 20 puntos de medición ($\sum_i \sum_j \mu(i, j)$) se muestra en la Figura 6.17. La curva está normalizada por el valor máximo, que en este caso se produce en el último punto de medición ($\sigma = 0,72$). Se observa como previo a que la cavitación

adherida cubra toda la garganta ($\sigma = 0,91$), μ es cercano a cero; a medida que aumenta el grado de intensidad de la cavitación, μ aumenta de forma lineal. También se observa el cambio abrupto en las estructuras cavitantes, que se produce entre $\sigma = 0,91$ y $\sigma = 0,97$.

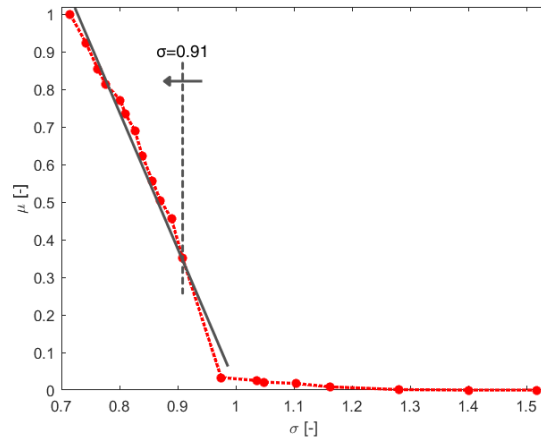


Figura 6.17: Valor promedio del nivel de gris, sumado y normalizado con el valor máximo

6.4.2. Desviación estándar del nivel de gris

A continuación se muestran ejemplos del valor de la desviación estándar para los mismos estados que en el caso anterior.

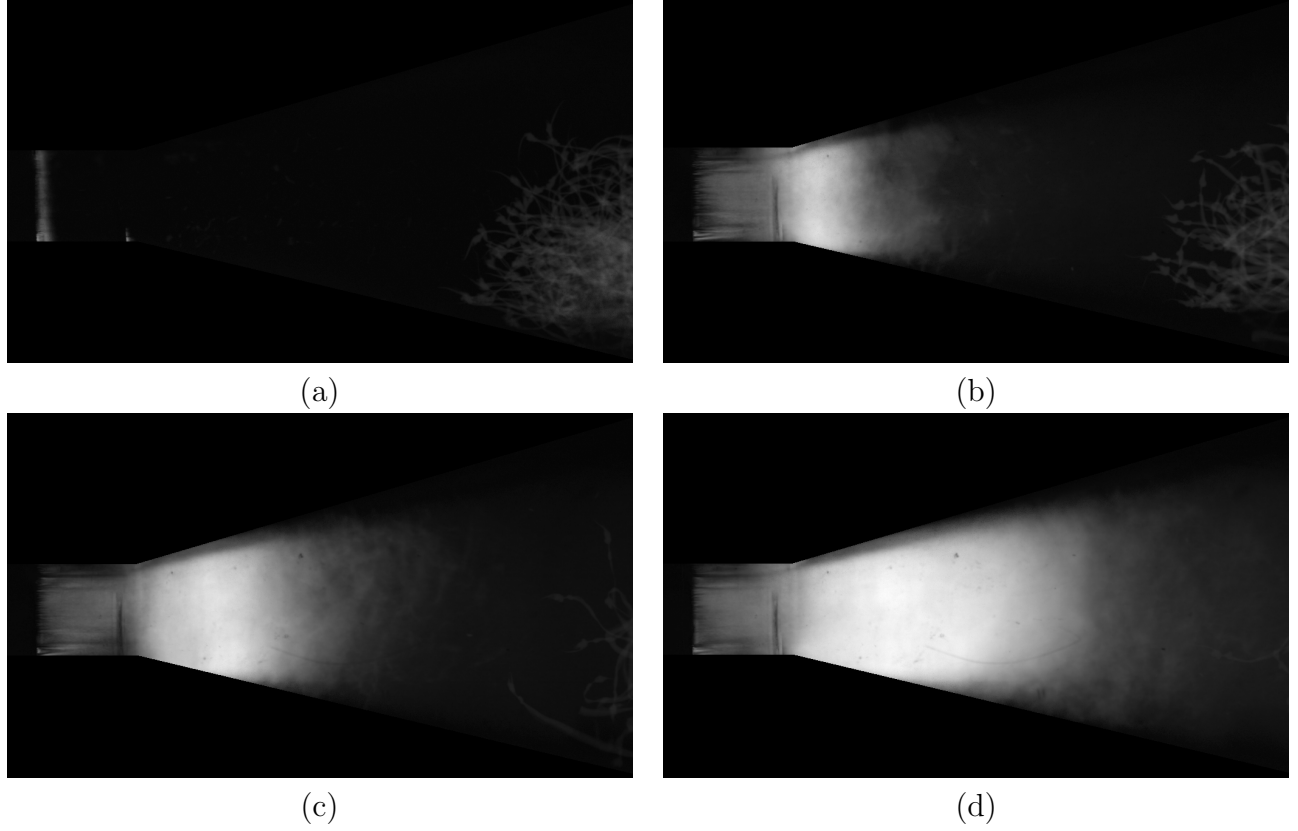


Figura 6.18: *Desviación estándar del nivel de gris para $\sigma = 1,05$ (a), $\sigma = 0,91$ (b), $\sigma = 0,81$ (c) y $\sigma = 0,72$ (d)*

La desviación estándar muestra un comportamiento similar al valor promedio, como se observa en la Figura 6.19. También se nota que cuando $\sigma = 0,91$ se produce un cambio abrupto en ese punto de medición. Esto no se observa en mediciones anteriores; probablemente se deba a inestabilidades producidas por el cambio en todos los parámetros medidos.

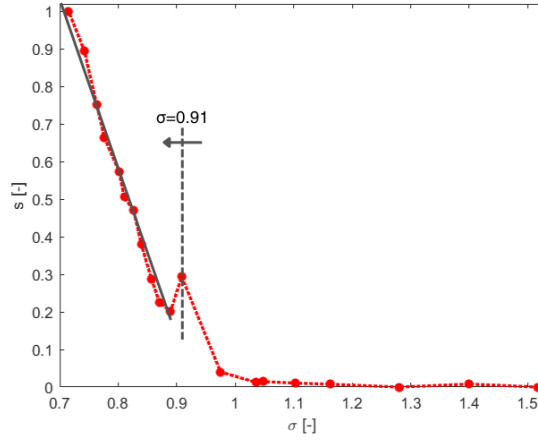


Figura 6.19: Desviación estándar del nivel de gris, sumado y normalizado con el valor máximo

6.4.3. Largo de la cavitación adherida

Del análisis del nivel de gris es posible obtener el largo de las estructuras de la cavitación. El valor promedio del nivel de gris muestra con mayor intensidad las estructuras que están siempre presentes (cavitación adherida). Una vez que empieza a disminuir la intensidad de μ , es porque empieza la zona de desprendimiento de nubes de cavitación.

Con respecto a la desviación estándar, esta muestra con mayor intensidad las zonas en donde se producen mayores cambios en las estructuras, con respecto al valor promedio. Lo cual ocurre en la zona de desprendimiento y condensación de estructuras.

De las imágenes del valor promedio y de la desviación estándar, se observa que es difícil distinguir con claridad las distintas zonas mencionadas cuando σ es menor a 0,84, debido a la información que aportan las estructuras desprendidas al moverse. Para solucionar esto, se decide elegir 50 imágenes que muestren la cavitación adherida previo a que se produzca un desprendimiento. Un criterio adecuado para suponer dicho momento es cuando acaba de desaparecer una estructura ya desprendida, como se observa en la Figura 6.7 (a).

En la Figura 6.20 se grafica el largo de la cavidad adherida con respecto a σ . Se observa el marcado aumento de aproximadamente 420 % en la longitud de la cavitación, que se produce entre $\sigma = 0,97$ y $\sigma = 0,91$. También se observa que el largo de la cavitación no cambia tanto, antes ni después de dicho cambio abrupto. En el Apéndice C se muestran ejemplos de cuatro valores de σ diferentes de este análisis del nivel de gris modificado.

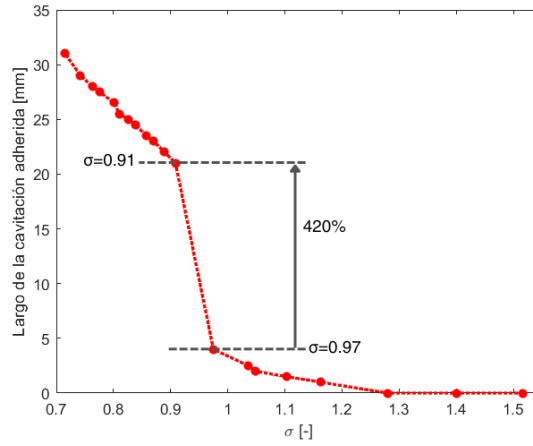


Figura 6.20: *Largo de la cavidad adherida con respecto al número de cavitación*

6.4.4. Evaluación del número adecuado de imágenes

Con el objetivo de comprobar si el número de imágenes utilizadas para el análisis del nivel de gris es adecuado, se realiza un estudio de la variación de imágenes capturadas. La variación porcentual se estabiliza alrededor del paso quince, usando un paso de 10 imágenes, según se describe en la subsección 5.6.1. Esto implica que, a partir de las 150 - 160 imágenes, la diferencia porcentual no disminuye significativamente al aumentar el número de imágenes usadas para calcular el valor promedio de gris, como se observa en la Figura 6.21.

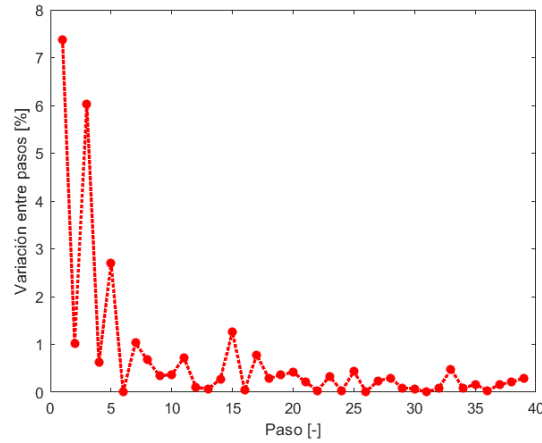


Figura 6.21: *Variación porcentual entre el valor promedio calculado con distintos números de imágenes, según un paso de aumento de 10 imágenes, con $\sigma = 0,91$*

6.5. Obtención de la onda de presión

Según se menciona en la subsección 5.6.2, utilizando la Ecuación 5.10 se obtiene la amplitud de la onda de presión (p_0) que produce la condensación de las nubes de cavitación. Para este análisis se requiere conocer la constante k_1 , la diferencia de presión estática entre el interior y exterior de las burbujas, y la variación temporal de las estructuras de la cavitación.

La constante k_1 corresponde al valor máximo de la amplitud de una onda de presión, obtenida de forma experimental, la cual se asume de 6 [MPa].

La presión que existe dentro de las burbujas se asume como p_v . La presión afuera (p_∞) depende del lugar en donde se produce la condensación de la nube. La forma más adecuada de obtener este valor es estimando el gradiente de presión estática que existe a lo largo de la zona divergente del tubo Venturi, de forma experimental o numérica. Según se explica en la subsección 5.6.2, se asume una presión estática $p_\infty = 0,5 p_{out}$.

Por último, se requiere obtener la variación del volumen de las estructuras de la cavitación con respecto al tiempo; esto se logra sumando la información de la imagen que se obtiene al calcular la desviación estándar del nivel de gris ($\sum_i \sum_j s(i, j)$).

Con los parámetros mencionados, y según la Ecuación 5.10, se obtiene la estimación de la amplitud de la onda de presión, la que se muestra en la Figura 6.22. Se observa un comportamiento similar al que muestra la desviación estándar (Figura 6.19) cuando $\sigma = 0,91$.

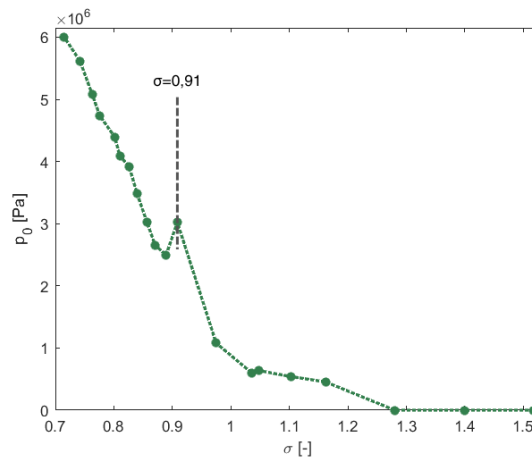


Figura 6.22: Estimación de la onda de presión producida por el colapso de estructuras de la cavitación

6.5.1. Estimación de la fracción de vapor y de las propiedades del fluido

En la Figura 6.23 se muestra la estimación de la fracción de vapor con respecto a σ , obtenida con la Ecuación 5.12, según se describe en la Subsección 5.6.4. Para estimar esta variable se requiere la constante k_2 y la información sumada del valor promedio del nivel de gris ($\sum_i \sum_j \mu(i, j)$). El valor de k_2 se relaciona con la fracción de vapor máximo que se logra en el tubo Venturi. Se asume un valor de $\alpha = 0,3$, el cual es característico de cavitación parcial.

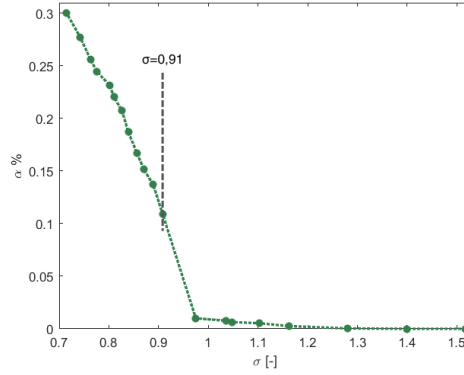


Figura 6.23: Estimación de la fracción de vapor, a partir del valor promedio del nivel de gris, con respecto al número de cavitación

La temperatura del agua durante los ciclos de medición fue de $21 \pm 1^\circ\text{C}$; por consiguiente, se utiliza una temperatura promedio de 20°C para la obtención de propiedades físicas, siendo estas las descritas en la Tabla 5.5.

Una vez estimada α , se procede a obtener la velocidad del sonido, densidad y viscosidad para un flujo bifásico (con fracción de vapor α) utilizando las Ecuaciones 5.13, 5.14 y 5.15, respectivamente. En la Figura 6.24 se muestran estas tres propiedades graficadas con respecto a σ .

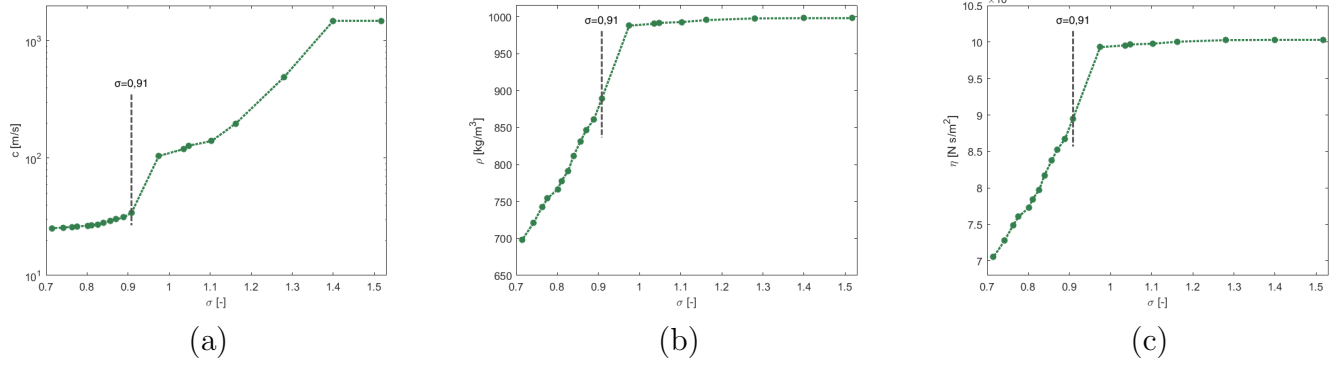


Figura 6.24: *Propiedades físicas (velocidad del sonido (a), densidad (b) y viscosidad (c)) del flujo bifásico con respecto a σ*

6.5.2. Atenuación de la amplitud de la onda de presión

Según se detalla en la Subsección 5.6.5, para estimar la atenuación que producen el flujo bifásico y el agua líquida sobre la onda de presión, se requiere conocer el espesor del medio que atraviesa la onda (x_{fb} y x_a), las propiedades del fluido descritas en la sección anterior y la frecuencia de la onda de presión (f).

El espesor del flujo bifásico x_{fb} y del agua líquida x_a se pueden obtener analizando las imágenes del valor promedio y desviación estándar del nivel del gris. Cuando se produce un anillo de burbujas en el inicio de la garganta, la fracción de vapor es aproximadamente cero; por consiguiente, la onda de presión solo atraviesa agua líquida. Cuando se produce cavitación adherida y parcial, en cambio, es difícil distinguir con claridad el espesor del agua líquida, ya que esta variable tiende a ser muy pequeña. La opción más razonable bajo estas circunstancias es asumir que solo se tiene una zona de flujo bifásico.

La onda de presión atenuada, según la Ecuación 5.16, se muestra en la Figura 6.25 (a), en donde se consideran tres frecuencias distintas. También se gráfica la amplitud de la onda de presión (p_0), descrita en la Sección 6.5. Se observa la atenuación sobre p_0 y la influencia de la frecuencia de la onda sobre esta.

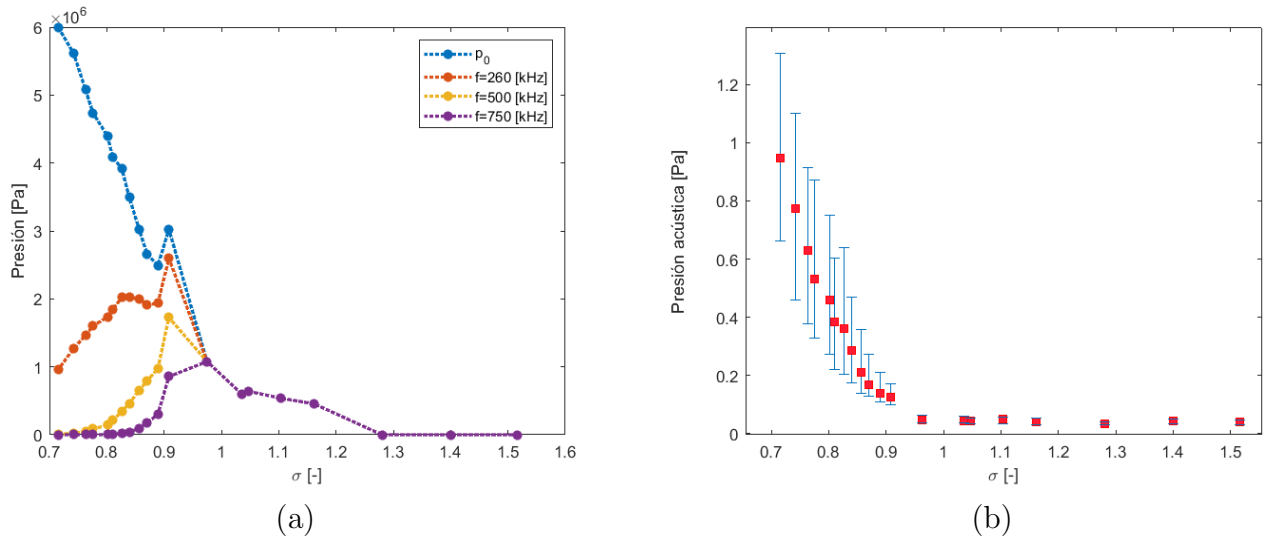


Figura 6.25: Atenuación de la onda de presión para tres distintas frecuencias junto a la presión sin atenuar p_0 (a) y presión acústica obtenida de las mediciones del nivel de presión sonora (b)

En la Figura 6.25 (b) se observa la presión acústica obtenida de las mediciones del nivel de presión sonora descritas y analizadas en la Subsección 6.3.3, despejando el valor de la presión acústica (p) desde la relación logarítmica que define el nivel de presión sonora (según la Ecuación 3.14). Se observa una tendencia similar a la estimación de la onda de presión sin atenuar (p_0).

Un aspecto que considerar es la sensibilidad de la atenuación de la onda de presión a la frecuencia de la onda de presión; al duplicar este valor, la curva cambia abruptamente, como se observa en la Figura 6.25 (a). Esto es problemático, ya que este valor se obtiene de referencias. La configuración geométrica en donde se produce cavitación pareciera ser condicionante de la frecuencia, ya que los distintos valores referenciados en la subsección se obtienen en tres geometrías diferentes: un hydrofoil ($f = 750$ [kHz]), una turbina Kaplan ($f = 500$ [kHz]) y un tubo convergente-divergente tipo cuña ($f = 260$ [kHz]). También se observa que para ondas de mayor frecuencia, mayor es la atenuación que produce el flujo bifásico.

Una desventaja del instrumento de medición acústica usado es la frecuencia máxima que logra medir (8 [kHz]). Si se quisiera hacer un análisis más exhaustivo con respecto a la atenuación de ondas sonoras de muy alta frecuencia, se tendría que adquirir un equipo que logre registrar altas frecuencias, como por ejemplo un sensor de emisión acústica. También ayudaría el conocer las frecuencias de las ondas de choque que se producen en esta configuración geométrica específica, mediante un transmisor de presión dinámica de muy alta frecuencia de muestreo. Dichos instrumentos de medición son de alto costo y de difícil disponibilidad.

Capítulo 7

Conclusiones

La cavitación es un fenómeno difícil de estudiar por su complejidad; en muchos casos se requiere instrumentación específica, la cual puede ser difícil de adquirir por altos costos o baja accesibilidad. Sin embargo, con los instrumentos disponibles se logra cumplir con los objetivos de este trabajo y estudiar correctamente la cavitación.

En el banco de ensayos se produce cavitación entre distintos estados e intensidades. Para esto se modifica el caudal de agua con el variador de frecuencia entre 1 500 - 2 700 [rpm]. No es posible alcanzar la máxima velocidad posible; sin embargo, a 2 900 [rpm], la cavitación es del mismo tipo (cavitación parcial) que a 2 700 [rpm], solo que de mayor intensidad. Se logra registrar una serie de parámetros que permiten estudiar el fenómeno, como lo son la presión estática, temperatura, caudal y emisiones acústicas. Para registrar esta última variable se adquiere un sonómetro. La intensidad de la cavitación se caracteriza con el número de cavitación (σ), en donde se utiliza la presión estática a la salida del tubo como presión de referencia.

Cuando se analiza la presión estática a la entrada y salida del tubo, se logra observar el efecto que la cavitación produce sobre esta, en donde a mayor intensidad de la cavitación, mayor es la caída de presión (Δp), alcanzando un aumento del 50 % en el último punto de medición con respecto al primer punto. Esta caída de presión también está influenciada por las pérdidas hidráulicas en la garganta del tubo, ya que la velocidad del agua en la garganta aumenta considerablemente, desde los 13 [m/s] a los 24 [m/s], entre el primer y el último punto de medición. Con respecto al caudal, ocurre algo poco esperable: aumenta por sobre el caudal teórico, para luego volver a alcanzar la curva teórica. El aumento máximo por sobre el teórico es de un 6 % y se da en el punto en donde se produce el cambio más abrupto en las dinámicas de la cavitación ($\sigma = 0,91$). Esto puede explicarse por el efecto de dos variables: primero, el aumento de la presión estática a la entrada del tubo, que es favorable a un aumento del caudal; y segundo, a las estructuras de la

cavitación que entorpecen el flujo a medida que aumenta la intensidad de la cavitación.

Las emisiones acústicas aumentan considerablemente a medida que aumenta la intensidad de la cavitación. Desde el primer punto de medición hasta que esta cubre toda la garganta ($\sigma = 0,91$), existe un aumento de 10 [dB] en el nivel de presión sonora, y desde este punto de medición hasta el último, hay un aumento de 17,5 [dB]. Analizando las mediciones, también se observa que es posible identificar cuando la cavitación se vuelve parcial, ya que el rango entre el valor mínimo y máximo también aumenta de forma notoria, aspecto que es posible medir sin tener acceso al interior del flujo. Un aspecto que tener en consideración, con respecto a las mediciones de emisiones acústicas, es el instrumento utilizado, el cual tiene como frecuencia máxima de medición 8 [kHz], el cual es un valor bajo en comparación a otros instrumentos comúnmente usados en trabajos similares. Sin embargo, la cavitación produce emisiones sonoras en un rango muy amplio de frecuencias (hasta 3 [MHz]), y según lo observado en las mediciones acústicas realizadas en este trabajo, se aprecia como el rango de frecuencias utilizado permite conocer la intensidad de la cavitación.

Con las imágenes adquiridas se logra observar la cavitación, reconocer dinámicas y estructuras entre los distintos estados. Con las imágenes también, se realiza un análisis del nivel de gris, en donde se obtiene el nivel promedio y la desviación estándar del nivel de gris para los 20 puntos de medición. Estas variables son usadas para estimar la onda de presión y la atenuación de esta. La amplitud de la onda de presión muestra un comportamiento razonable cuando se compara con las emisiones acústicas registradas con el sonómetro. Lo cual tiene sentido, ya que las diversas variables usadas para esto, como la variación del volumen de las estructuras con respecto al tiempo, la fracción de vapor y las propiedades del medio (velocidad del sonido, densidad y viscosidad) también entregan resultados esperables. El único parámetro problemático es la frecuencia de la onda de presión, ya que es difícil obtener un valor para esta configuración geométrica específica.

7.1. Aspectos a mejorar y trabajos futuros

Primero, se debería realizar mantención al tubo Venturi; presenta una pequeña capa de tierra en la zona convergente. En la unión del tubo al conector de PVC, se presenta una pequeña fuga de agua, la cual se debería sellar. También se observa algo de erosión en la parte superior de la zona divergente.

El sistema de adquisición de datos se debiera adecuar para poder conectarlo a un computador y obtener mediciones en tiempo real. También sería beneficiosa la adquisición de otros sensores,

como lo es un transmisor de presión para obtener la presión en la garganta del tubo, o en su defecto habilitar la configuración existente, que consiste en una línea de presión que conecta el agujero realizado en la garganta del tubo con un transmisor ya existente mediante un manifold.

La forma ideal de poder obtener un rango más amplio de estados de cavitación es modificando el circuito a uno cerrado, en donde se pueda variar la presión a la salida del tubo. De esta forma se favorece la aparición de la cavitación, sin la necesidad de aumentar el caudal hasta límites peligrosos para la unión del tubo Venturi.

Con respecto a los trabajos futuros, desde hace algunos años, ha habido un aumento en trabajos numéricos que simulen métodos de desprendimiento, efectos de la cavitación sobre el flujo y medición o estimación de la fracción de vapor.

Bibliografía

- Akhatov, I., Lindau, O., Topolnikov, A., Mettin, R., Vakhitova, N., and Lauterborn, W. (2001). Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble. *Physics of Fluids*, 13(10):2805–2819. DOI:10.1063/1.1401810.
- Ardiansyah, T., Takahashi, M., and Chen, X. (2011). Comparison of the water and sodium cavitation phenomena in venturi. *The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE)*, 2011.19. https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2011.19.ICONE1943_218.
- Attenborough, K. and Postema, M. (2008). A pocket-sized introduction to acoustics. *The University of Hull*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7504060>.
- Audio-Technica (s.f.). Soporte: Una breve guía de micrófonos. Recuperado el 28 de junio de 2024 de <https://www.audio-technica.com/es-ar/support/una-breve-guia-de-microfonos-que-hace-un-microfono>.
- Bark, G. and Van Berlekom, W. B. (1979). Experimental investigations of cavitation dynamics and cavitation noise experimental. *12th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR, Washington DC*.
- Blake, W. K. (2017). *Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Volume 1: General Concepts and Elementary Sources*. Academic Press.
- Bolovic, K. (2019). Evaluación, equipamiento y puesta en marcha del banco de ensayos de bombas centrifugas del laboratorio de termofluidos según Norma ISO 9906-2012 [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://hdl.handle.net/11673/49004>.
- Brennen, C. E. (2005). *Fundamentals of Multiphase Flow*. Cambridge University Press.
- Brennen, C. E. (2013). *Cavitation and Bubble Dynamics*. Cambridge University Press.
- Brennen, C. E. (2015). Cavitation in medicine. *Interface Focus*, 5(5). DOI:10.1098/rsfs.2015.0022.

- Brüel and Kjær (s.f.). Product data sound intensity probe kit type 3599. Recuperado el 27 de junio de 2024 de <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1880.ashx>.
- Callenaere, M., Franc, J.-P., Michel, J.-M., and Riondet, M. (2001). The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 444:223–256. DOI:10.1017/S0022112001005420.
- Cerna, M. and Harvey, A. F. (2000). The fundamentals of fft-based signal analysis and measurement. *Application Note 041, National Instruments*, pages 1–20.
- Dular, M., Bachert, B., Stoffel, B., and Širok, B. (2004). Relationship between cavitation structures and cavitation damage. *Wear*, 257(11):1176–1184. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.08.004>.
- Dular, M. and Bachert, R. (2009). The issue of strouhal number definition in cavitating flow. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 55(11):666–674.
- Dular, M., Stoffel, B., and Širok, B. (2006). Development of a cavitation erosion model. *Wear*, 261(5):642–655. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.020>.
- Everest, F. A. and Pohlmann, K. C. (2022). *The Master Handbook of Acoustics*. McGraw Hill, 7th edition.
- Ferrari, A. (2017). Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473(2199):20160345. [dx.doi.org/10.1098/rspa.2016.0345](https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0345).
- Fortes-Patella, R., Reboud, J. L., and Briancon-Marjollet, L. (2004). A phenomenological and numerical model for scaling the flow aggressiveness in cavitation erosion.
- Franc, J.-P. and Michel, J.-M. (2005). *Fundamentals of Cavitation*. Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.
- Ganesh, H., Mäkiharju, S. A., and Ceccio, S. L. (2016). Bubbly shock propagation as a mechanism for sheet-to-cloud transition of partial cavities. *Journal of Fluid Mechanics*, 802:37–78. DOI:10.1017/jfm.2016.425.
- Hofmann, M. (2001). Ein beitrag zur verminderung des erosiven potentials kav- itierender st- omungen, phd thesis. *Technische Universität Darmstadt*.
- Jahangir, S., Wagner, E. C., Mudde, R. F., and Poelma, C. (2019). Void fraction measurements in partial cavitation regimes by x-ray computed tomography. *International Journal of Multiphase Flow*, 120(103085). DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103085.

- Kato, H., Ye, Y., and Maeda, M. (1989). Cavitation erosion and noise study on a foil section. *Proc. ASME Int. Symp. on Cavitation in Hydraulic Structures and Turbomachinery, Albuquerque (USA)*.
- Kistler (s.f.). Acoustic emission sensor. Recuperado el 28 de junio de 2024 de <https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce.Download.original/003-120e.pdf>.
- Kozublová, M., Bojko, M., Jablonská, J., Homa, D., and Tůma, J. (2016). Experimental research of multiphase flow with cavitation in the nozzle. *EPJ Web of Conferences*, 114:02058. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611402058>.
- Li, M., Bussonniere, A., Bronson, M., Xu, Z., and Liu, Q. (2019). Study of venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*, 132:268–274. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.001>.
- Long, X., Zhang, J., Wang, J., Xu, M., Lyu, Q., and Ji, B. (2017). Experimental investigation of the global cavitation dynamic behavior in a venturi tube with special emphasis on the cavity length variation. *International Journal of Multiphase Flow*, 89:290–298. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.11.004.
- Lord Rayleigh, . (1917). On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 34(200):94–98. DOI:10.1080/14786440808635681.
- Mancuso, G. (2018). Experimental and numerical investigation on performance of a swirling jet reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 49:241–248. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.011>.
- Mäkiharju, S. A., Ganesh, H., and Ceccio, S. L. (2017). The dynamics of partial cavity formation, shedding and the influence of dissolved and injected non-condensable gas. *Journal of Fluid Mechanics*, 829:420–458. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.569>.
- NTI Audio AG, . (s.f.). Nti conocimientos. Recuperado el 15 de octubre de 2024 de <https://www.nti-audio.com/es/servicio/conocimientos>.
- Petkovsek, M. and Dular, M. (2013). Simultaneous observation of cavitation structures and cavitation erosion. *Wear*, 300(1):55–64. DOI:10.1016/j.wear.2013.01.106.
- Petkovšek, M., Hočevár, M., and Dular, M. (2020). Visualization and measurements of shock waves in cavitating flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 119(110215). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110215>.

- Plesset, M. S. (1949). The dynamics of cavitation bubbles. *Journal of Applied Mechanics*, 16(3):277–282. DOI:10.1115/1.4009975.
- Plesset, M. S. and Chapman, R. B. (1971). Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 47(2):283–290. <https://doi.org/10.1017/S0022112071001058>.
- Reisman, G. E., Wang, Y.-C., and Brennen, C. E. (1998). Observations of shock waves in cloud cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*, 355:255–283. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007830>.
- Rudolf, P., Hudec, M., Gríger, M., and Štefan, D. (2014). Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations. *EPJ Web of Conferences*, 67:02101. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20146702101>.
- Rus, T., Dular, M., Širok, B., Hočevár, M., and Kern, I. (2007). An investigation of the relationship between acoustic emission, vibration, noise, and cavitation structures on a kaplan turbine. *Journal of Fluids Engineering*, 129(9):1112–1122. <https://doi.org/10.1115/1.2754313>.
- Sayyaadi, H. (2010). Instability of the cavitating flow in a venturi reactor. *Fluid Dynamics Research*, 42(5). DOI:10.1088/0169-5983/42/5/055503.
- Shimada, M., Matsumoto, Y., and Kobayashi, T. (1999). Dynamics of the cloud cavitation and cavitation erosion. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 65(634):1934–1941. <https://doi.org/10.1299/kikaib.65.1934>.
- Smith, S. W. (1999). *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, 2nd edition edition.
- Soyama, H. and Hoshino, J. (2016). Enhancing the aggressive intensity of hydrodynamic cavitation through a venturi tube by increasing the pressure in the region where the bubbles collapse. *AIP Advances*, 6(4). <https://doi.org/10.1063/1.4947572>.
- Stoffel, B. and Schuller, W. (1992). Investigations in respect to the determination of cavitation intensity by the means of acoustic signals. *La Houille Blanche*, 78(7-8):601–604. <https://doi.org/10.1051/lhb/1992064>.
- Stutz, B. and Reboud, J.-L. (2000). Measurements within unsteady cavitation. *Experiments in Fluids*, 29(6):552–545. <https://doi.org/10.1007/s003480000122>.
- Toro, A. (2024). Adaptación del banco de ensayo de bombas centrífugas del laboratorio de termofluidos, para estudio del fenómeno de la cavitación [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].

- Varga, J. and Sebestyén, G. (1966). Experimental investigation of cavitation noise. *La Houille Blanche*, 52(8):905–910. <https://doi.org/10.1051/lhb/1966057>.
- Wang, C., Huang, B., Wang, G., Zhang, M., and Ding, N. (2017). Unsteady pressure fluctuation characteristics in the process of breakup and shedding of sheet/cloud cavitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114:769–785. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.005.
- Xu, S., Wang, J., Cheng, H., Ji, B., and Long, X. (2020). Experimental study of the cavitation noise and vibration induced by the choked flow in a venturi reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67:105183. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105183>.
- Yan, Y. and Maurya, D. (2015). Principles of piezoelectric energy harvesting. Recuperado el 15 de junio de 2024 de <https://www.americanpiezo.com/blog/piezoelectric-energy-harvesting/>.

Apéndice A

Mediciones de los distintos parámetros

Tabla A.1: *Mediciones experimentales*

Velocidad de rotación [rpm]	Caudal [m^3/hr]	P_{in} [bar]	P_{out} [bar]	Número de cavitación [-]	Tempera- tura [$^{\circ}C$]	SPL (me- dio) [dB]
1 500	8,56	0,664	0,282	1,52	22,77	65,93
1 600	9,10	0,759	0,343	1,40	22,78	66,67
1 700	9,76	0,864	0,417	1,28	22,88	65,01
1 800	10,39	0,972	0,460	1,16	22,78	66,51
1 850	10,76	1,029	0,488	1,10	22,77	67,94
1 900	11,10	1,095	0,501	1,05	22,79	66,99
1 950	11,35	1,156	0,559	1,04	22,79	67,00
2 000	11,70	1,238	0,558	0,97	22,80	67,68
2 050	12,42	1,256	0,643	0,91	22,80	75,99
2 100	12,63	1,329	0,663	0,89	22,82	76,93
2 150	12,85	1,406	0,685	0,87	22,81	78,53
2 200	13,05	1,486	0,713	0,86	22,83	80,50
2 250	13,24	1,563	0,727	0,84	22,83	83,10
2 300	13,47	1,644	0,764	0,83	22,84	85,14
2 350	13,70	1,734	0,789	0,81	22,85	85,66
2 400	13,89	1,817	0,821	0,80	22,86	87,25
2 450	14,13	1,899	0,824	0,78	22,86	88,51
2 500	14,36	1,989	0,853	0,76	22,87	89,96
2 600	14,76	2,183	0,907	0,74	22,89	91,75
2 700	15,20	2,370	0,951	0,72	22,89	93,50

Apéndice B

Código usado para el análisis de gris

```
%valor promedio del nivel de gris-----
t=17; % estado de cavitacion (manual)
n=400; % numero de fotos de cada estado o etapa

ry1=1;% resolucion fotogramas
ry2=778;
rx1=1;
rx2=1032;

ref=double(imread("ref.tif")); %referencia

xr=[0 215 1032 1032 215 0]; % componetes de los puntos que definen el ROI
yr=[245 245 0 590 390 390];
BW = roipoly(ref,xr,yr); % matriz logica del ROI

% promedio nivel de gris
mu_gris=zeros(ry2-ry1+1,rx2-rx1+1,'double');
nombre="RecordedImage_CM-080GE_00-0C-DF-02-93-06_";
for i=1:n
    if i<10
        imagen=abs(double(imread(nombre+"00"+i+".tif"))-ref);
        mu_gris=mu_gris+imagen;
    elseif i<100
        imagen=abs(double(imread(nombre+"0"+i+".tif"))-ref);
        mu_gris=mu_gris+imagen;
```

```

        else
            imagen=abs(double(imread(nombre+i+".tif"))-ref);
            mu_gris=mu_gris+imagen;
        end
    end
    mu_gris=mu_gris/n.*BW;

%desviacion estandar del nivel de gris-----

s_gris=zeros(ry2-ry1+1,rx2-rx1+1,'double');
for i=1:n
    if i<10
        imagen=abs(double(imread(nombre+"00"+i+".tif"))-ref);
        s_gris=s_gris + (imagen-mu_gris).^2;
    elseif i<100
        imagen=abs(double(imread(nombre+"0"+i+".tif"))-ref);
        s_gris=s_gris + (imagen-mu_gris).^2;
    else
        imagen=abs(double(imread(nombre+i+".tif"))-ref);
        s_gris=s_gris + (imagen-mu_gris).^2;
    end
end
s_gris= sqrt(s_gris/(n-1)).*BW;

% Vector que contiene los valores sumados de las matrices de mu
% y s, para los estados de cavitacion (t)-----

Total_mu(t)= sum(mu_gris,"all");
Total_s(t)= sum(s_gris,"all");

total_mu=Total_mu-min(Total_mu);
total_s=Total_s-min(Total_s);

```

Apéndice C

Largo de la cavitación adherida

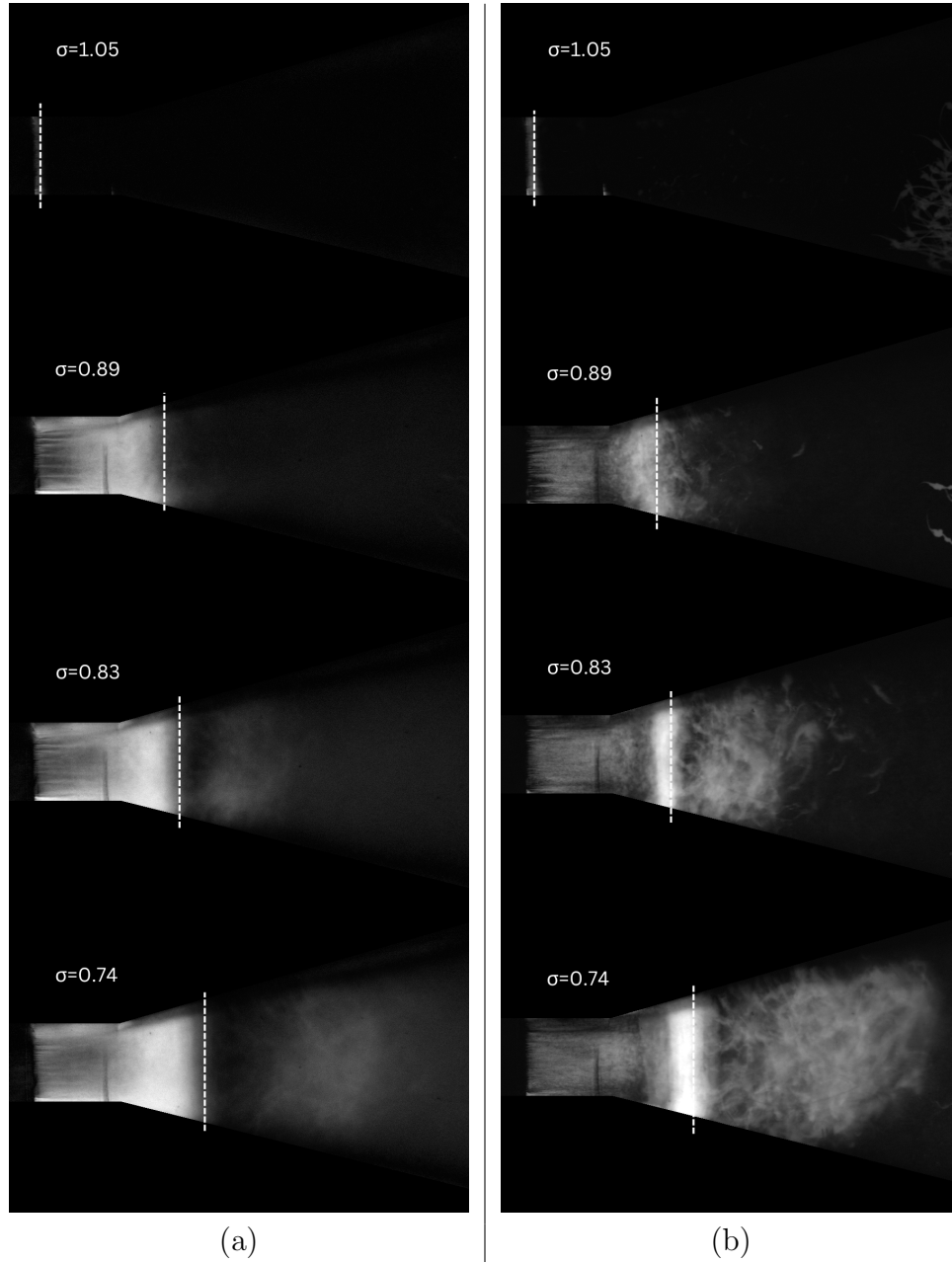


Figura C.1: *Análisis de gris para la obtención del largo promedio de la cavidad adherida, para los números de cavitación $\sigma = 1,05$, $0,89$, $0,83$ y $0,74$. En (a) se muestra el valor promedio y en (b) la desviación estándar*