



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE
CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA EMPRESA ABAXFEM”

AUTORES

LAFUENTE FLORES, ESTEBAN FERNANDO

LÓPEZ CEVALLOS, HÉCTOR ANDRÉ

DIRECTOR: ING. FERNÁNDEZ DÍAZ, EDGARDO DANIEL

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA EMPRESA ABAXFEM*" fue realizado por los señores *LAFUENTE FLORES ESTEBAN FERNANDO* y *LÓPEZ CEVALLOS HÉCTOR ANDRÉ* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de mayo del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Edgardo Fernández', escrita sobre una línea horizontal.

ING. EDGARDO FERNÁNDEZ

C.C. 1710674563

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **LAFUENTE FLORES ESTEBAN FERNANDO**, con cédula de identidad N° 100359955-0 y **LÓPEZ CEVALLOS HÉCTOR ANDRÉ**, con cédula de identidad N° 100343427-9, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: que este trabajo de titulación **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA EMPRESA ABAXFEM"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 08 de mayo del 2018

LAFUENTE FLORES ESTEBAN FERNANDO
C.C. 100359955-0

LÓPEZ CEVALLOS HÉCTOR ANDRÉ
C.C. 100343427-9



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA


DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **LAFUENTE FLORES ESTEBAN FERNANDO** y **LÓPEZ CEVALLOS HÉCTOR ANDRÉ**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación "**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA EMPRESA ABAXFEM**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 08 de mayo del 2018


LAFUENTE FLORES ESTEBAN FERNANDO
C.I. 100359955-0


LÓPEZ CEVALLOS HÉCTOR ANDRÉ
C.I. 100343427-9

DEDICATORIA

*Dedico este proyecto de investigación a mis padres Marco y Rosy, quienes han sido el apoyo incondicional en mi vida y a mi hermano Juan José por su cariño y afecto.
Con mucho amor para toda mi familia por la unión y la alegría brindada siempre.
A María Cristina por el amor demostrado.
A todos mis amigos que he conocido en la vida universitaria, con los cuales he compartido grandes momentos.*

Esteban Lafuente

*Con todo mi amor:
A mis padres Héctor y Sandra
Y a mis hermanos Karen y Mateo.*

Héctor López

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser el pilar fundamental sobre el cual se basa mi vida.

A mis padres Marco y Rosy por su amor, cariño y confianza que me han brindado durante toda mi trayectoria estudiantil, por siempre apoyarme en todos mis anhelos, aspiraciones y sobre todo por inculcarme los valores que me servirán en mi vida personal y profesional.

A mi hermano Juan José por llenarme cada día de ilusiones, alegrías y motivación para cumplir mis objetivos.

Al Ing. Edgardo Fernández, por la ayuda brindada como director de este proyecto, por el tiempo dedicado para esta investigación y principalmente por los consejos acertados que nos motivan a seguir adelante en el ámbito de la investigación y de la ingeniería.

A la empresa ABAXFEM por el patrocinio para la elaboración del banco de pruebas.

A la carrera de Ingeniería Mecánica por abrirme las puertas y forjarme como profesional.

Un agradecimiento imperecedero a Alma Koch, por ayudarnos, pese a toda dificultad, en el análisis microbiano de esta tesis.

A todas las personas que me han brindado su apoyo durante mi carrera estudiantil, a mis amigos con quienes he compartido momentos que perdurarán en el tiempo, de manera especial a mi compañero de tesis Héctor y al Laboratorio de Fluidos Complejos por facilitarnos los equipos para la mejor realización de este estudio.

Esteban Lafuente

A mis amados padres Héctor y Sandra, por todo el cariño y amor que han depositado en mí, regalándome los valores y aptitudes para desarrollarme personal y profesionalmente. Gracias por brindarme día a día su apoyo y amor incondicional.

A mis queridos hermanos Karen y Mateo, porque son la alegría y la motivación para expandir mis límites y superarme constantemente.

Al Ing. Edgardo Fernández, tutor de este proyecto, quien ha sido guía para el desarrollo de este trabajo, dedicándonos su tiempo y compartiendo su vasta experiencia y conocimiento. Igualmente, agradezco a la empresa "ABAXFEM" por ser el motivo de desarrollo de este trabajo y su financiamiento.

Héctor López

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
1. CAPÍTULO GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e Importancia	2
1.3. Alcance.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Marco teórico.....	4
1.5.1. Cambios de estado líquido a vapor.....	4
1.5.2. Definiciones de Cavitación Hidrodinámica.....	6
1.5.3. Inicio de la cavitación.....	8
1.5.4. Cavitación en líquidos que fluyen	10
1.5.5. Factores determinantes para el inicio de la cavitación.....	12
1.5.6. Patrones de Cavitación.....	13
1.5.7. Ecuación de Rayleigh-Plesset	15
1.5.8. Definición de bacterias.....	17
1.5.9. Tinción diferencial (Tinción de Gram)	18
1.5.10. Endospora	19

1.5.11.	Desinfección	21
1.5.12.	Esterilización	22
1.5.13.	Potabilización del agua.....	22
1.5.14.	Contaminantes del agua.....	22
1.5.15.	Métodos de desinfección	23
1.5.16.	Desinfección química.....	24
1.5.17.	Mecanismos de destrucción de bacterias por cavitación.....	26
2.	CAPÍTULO DESARROLLO DEL EQUIPO Y PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	29
2.1.	Descripción del banco de pruebas hidrodinámico	29
2.2.	Diseño del Tubo Venturi	30
2.3.	Cálculos de diseño.	33
2.4.	Caídas de presión en el equipo de cavitación hidrodinámica.....	37
2.5.	Mediciones realizadas en el banco de pruebas.....	40
2.5.1.	Configuración y preparación del equipo.....	40
2.5.2.	Mediciones del comportamiento físico de la cavitación hidrodinámica	41
2.5.3.	Experimento de desinfección de agua residual	41
3.	CAPÍTULO ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
3.1.	Resultados obtenidos de los procesos de experimentación.....	43
3.2.	Dinámica de la burbuja de cavitación hidrodinámica.....	45
3.3.	Análisis energético de cavitación hidrodinámica	51
3.4.	Análisis de la dinámica básica de cavitación de burbujas de viaje.....	56
3.5.	Distancia recorrida por las burbujas de cavitación de viaje	58
3.6.	Mecanismo de desprendimiento de las cavidades	59
3.7.	Resultados de la experimentación bactericida	61
3.8.	Eficiencia energética	62
4.	CAPÍTULO CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO....	64
4.1.	Conclusiones.....	64
4.2.	Recomendaciones.....	65
4.3.	Trabajos futuros	66
4.	BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama P-v para cambio de fases.....	5
Figura 2. Diferencias entre ebullición y cavitación	7
Figura 3. Fuerzas en una burbuja de cavitación	9
Figura 4. Diagrama de presiones a lo largo de una línea de corriente	11
Figura 5. Cavitación de burbujas de viaje en un Venturi.....	14
Figura 6. Vórtices generando cavitación.....	14
Figura 7. Cavitación de lámina en un hidropiano.....	15
Figura 8. Esquema de una burbuja esférica en un líquido infinito	16
Figura 9. Disposiciones de los cocos, bacilos y otras formas bacterianas.	18
Figura 10. Formación de endosporas por esporulación.....	20
Figura 11. Ejemplos de localización y tamaño de las endosporas.....	21
Figura 12. Banco de pruebas de cavitación hidrodinámica	30
Figura 13. Tubo Venturi	31
Figura 14 Tasa de cambio de presión para diferentes.....	32
Figura 15. Geometría exacta del Tubo Venturi para experimentación.....	33
Figura 16. Secciones del Venturi para cavitación	33
Figura 17. Superficie de control en un tubo Venturi.....	35
Figura 18. Mala apariencia del Río Santa Clara	42
Figura 19. Conteo del número de unidades formadoras de colonias.....	42
Figura 20. Velocidades promedio de flujo en la parte divergente	48
Figura 21. Campo de presión en la parte divergente del Venturi.....	49
Figura 22. Crecimiento y colapso de una burbuja de cavitación.....	50
Figura 23. Volumen en contraste negro ocupado totalmente por burbujas	54
Figura 24. Relación proporcional con el software PCC	55
Figura 25. Diferentes marcos de video de un evento completo de crecimiento	58
Figura 26. Medición de la distancia recorrida por las.....	59
Figura 27. Comportamiento no lineal de la distancia de implosión de la burbuja	59
Figura 28. Mecanismo del jet entrante para el deprendimiento de las cavidades.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Elementos que conforman el banco de pruebas</i>	29
Tabla 2 <i>Datos experimentales del banco de pruebas</i>	43
Tabla 3 <i>Datos experimentales de temperatura para una intensidad $\sigma = 0.22$</i>	44
Tabla 4 <i>Datos experimentales de temperatura para una intensidad $\sigma = 0.24$</i>	44
Tabla 5 <i>Cálculo del coeficiente de descarga para la geometría Venturi</i>	45

RESUMEN

En esta tesis se describe el fenómeno de cavitación hidrodinámica que se producen en un tubo de Venturi. Se utilizó un circuito de prueba cerrado con la posibilidad de controlar el caudal y la presión estática para generar diferentes regímenes de cavitación. El comportamiento de la cavitación ha sido capturado por un sensor de temperatura, tres sensores de presión y una cámara de alta velocidad. Como resultados físicos de esta investigación, fue posible visualizar la dinámica de las burbujas de cavitación a través de una cámara de alta velocidad. Para identificar el comportamiento de la burbuja, se resolvió la ecuación de Rayleigh-Plesset estableciendo un aumento crítico en el tamaño de la burbuja. Debido al fenómeno del aumento de la temperatura en la cavitación hidrodinámica, se elaboró un balance de energía para confirmar la primera ley de la termodinámica, teniendo en cuenta la disipación de la energía calorimétrica producida por cada burbuja al realizar una compresión adiabática durante su vida útil. Este estudio además se presenta la cuantificación del fenómeno de cavitación hidrodinámica como un proceso de desinfección bacteriana en las aguas contaminadas del Río Santa Clara. El resultado del experimento muestra que la cavitación hidrodinámica es un método físico, que puede considerarse como una técnica potencial para un tratamiento de aguas a gran escala.

Palabras clave

- **CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA**
- **COMPORTAMIENTO DE LA CAVITACIÓN**
- **TUBO VENTURI**

ABSTRACT

Hydrodynamic cavitation phenomena occurring in a Venturi Tube is described in this thesis. A closed test circuit was used with the possibility of controlling the flow rate and the static pressure to generate different cavitation regimes. Cavitation behavior has been captured by a temperature sensor, three pressure sensors and a high-speed camera. As physical results of this research, it was possible to visualize the dynamics of the cavitation bubbles through a high-speed camera; to identify the behavior of the bubble, the Rayleigh-Plesset equation was solved establishing a critical increase in the size of the bubble. Due to the phenomenon of temperature increase in hydrodynamic cavitation, an energy balance was elaborated to confirm the first law of thermodynamics, taking into account the dissipation of calorimetric energy made by each bubble when doing an adiabatic compression work during its useful life. This study also presents the quantification of the phenomenon as a bacterial disinfection process in the polluted waters of the Santa Clara River. The result of the experiment shows that hydrodynamic cavitation is a physical method, which can be considered as a potential technique for a large-scale water treatment.

Key words

- **HYDRODYNAMIC CAVITATION**
- **CAVITATION BEHAVIOR**
- **VENTURI TUBE**

1. CAPÍTULO

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

Reynolds (1894) realiza experimentos en un tubo Venturi y verifica que se forman nubes de burbujas en las proximidades de la garganta, demostrando que el agua puede hervir a temperatura ambiente en un tubo mediante una caída de presión.

Charles Algernon Parsons (1895) construye el primer túnel hidrodinámico para ensayos de cavitación hidrodinámica, donde se acciona la hélice de un barco a vapor llamado Turbinia (Hogendoorn, 2017).

Lord Rayleigh (1917) expone un estudio sencillo y realista del colapso de una burbuja con simetría esférica; demostrando que en este fenómeno se pueden generar ondas de choque intensas y producir daño, en forma de erosión, al material sobre el que colapsen.

Plesset et al. (1977) presenta su contribución a una exhaustiva revisión de la literatura de la ecuación presentada por Rayleigh donde se incluyen los términos de viscosidad y tensión superficial (Plesset & Prosperetti, 1977).

A continuación, en el año 1986, A. Karimi y J. L. Martin realizan un estudio histórico de la cavitación y sus efectos nocivos, erosión y respuesta material, generación de campo causada por el colapso de la cavitación y los procesos físicos y químicos que contribuyen a los daños causados por la erosión. Durante los años 90 el énfasis de los investigadores se ha centrado en los efectos dañinos de la cavitación hidrodinámica.

En las últimas décadas, se han hecho esfuerzos concentrados por investigadores alrededor del mundo para aprovechar los espectaculares efectos de la cavitación

hidrodinámica en transformaciones físico/químicas. Jyoti y Pandit (2001) investigaron la aplicación de la cavitación para la desinfección de agua de pozo en diferentes reactores de cavitación utilizando una placa orificio y compararon su eficacia con el tipo de reactor ultrasónico, obteniendo como resultado que la cavitación hidrodinámica se puede utilizar para un mayor desarrollo frente a la cavitación ultrasónica que requiere más energía y por lo tanto un costo más elevado. Arrojo et al. (2005) ha investigado el efecto de diferentes diseños de cámara de cavitación y diversos parámetros operacionales sobre la tasa de inactivación de *Escherichia coli*, una de las bacterias más comunes presentes frecuentemente en el intestino distal de los organismos de sangre caliente (Benito & Arrojo, 2005). En los años posteriores se han realizado varias investigaciones para comprender las aplicaciones de la cavitación hidrodinámica y el comportamiento del fenómeno.

Después de más de un siglo de investigación, todavía hay preguntas abiertas o que surgen, y la física fundamental de la cavitación aún no se comprende del todo. La comprensión de esta física es importante, porque luego se pueden minimizar los efectos nocivos de la cavitación y maximizar los efectos positivos. El propósito de esta tesis implica un estudio experimental de cavitación hidrodinámica en una tobera axisimétrica convergente-divergente, y cuantificar el poder bactericida en la desinfección de las aguas del río Santa Clara.

1.2. Justificación e Importancia

La cavitación hidrodinámica es un fenómeno físico que implica una liberación de energía, presentando varias aplicaciones como la esterilización de alimentos, interrupción

de células microbianas, producción de biodiesel, desinfección de aguas residuales, entre otras.

En general, la cavitación ha sido asociada como un efecto negativo en el funcionamiento apropiado de un sistema hidráulico. Sin embargo, la importancia de este trabajo radica en comprender la física detrás del fenómeno, obtener una información detallada sobre los aspectos teóricos básicos de la cavitación, y estudiar su dinámica mediante una cámara de alta velocidad; para ser utilizada en la purificación de aguas residuales.

1.3. Alcance

En el presente proyecto se realizará un estudio de exploración científica del fenómeno de cavitación hidrodinámica a través de un tubo Venturi.

Dado que este fenómeno libera energía en forma de presión y temperatura (Franc, 2006), se utilizará como variable de estudio la disminución de la población bactericida frente a la cavitación con diferente intensidad; además de un estudio microbiológico para identificar la afectación de los microorganismos presentes en aguas residuales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un banco de pruebas para cavitación hidrodinámica.

1.4.2. Objetivos específicos

- Lograr el efecto de cavitación hidrodinámica mediante la utilización de un tubo Venturi, como dispositivo de caída de presión.

- Caracterizar el fenómeno de cavitación a través de datos hidrodinámicos para identificar las variables más importantes que favorecen al fenómeno.
- Verificar y cuantificar el efecto que tiene la cavitación hidrodinámica sobre una muestra de bacterias presentes en el agua del Río Santa Clara.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Cambios de estado líquido a vapor

“La cavitación es el proceso de nucleación en un líquido cuando la presión cae por debajo de la presión de vapor” (Brennen, 1995).

La nucleación son debilidades presentes dentro del líquido que favorecen a la cavitación y pueden ocurrir típicamente en dos formas.

- Los movimientos térmicos de las moléculas dentro del líquido forman vacíos microscópicos temporales que pueden constituir los núcleos necesarios para la ruptura y el crecimiento a burbujas. Estos núcleos son agujeros en el líquido de dimensiones moleculares y que, por lo tanto, pueden crecer en burbujas bajo tensiones líquidas. (Plesset , 1969).
- Otra forma importante de nucleación son las burbujas micrométricas de gas contaminante, que se encuentran suspendidas en el líquido, o que podrían estar presentes en grietas debido a la rugosidad del contenedor.

Una sustancia pura puede hallarse, dependiendo de los valores de presión y temperatura, en tres fases, conocidas habitualmente como estados de agregación de la materia: líquido, sólido y vapor. Para comprender el comportamiento de una sustancia pura se utiliza el diagrama P-v.

Si a un líquido puro en el estado A se despresuriza a temperatura constante como indica la Figura 1.1, entonces pueden suceder dos situaciones cuando la presión se reduce por debajo de la del punto B denominada presión de saturación.

- Si hay sitios de nucleación, el líquido se convertirá en vapor a medida que el estado se mueva horizontalmente de B a C, y a presión por debajo de la presión de vapor el estado llegará al equilibrio, en la región gaseosa como indica el punto E.
- Si no hay sitios de nucleación, es decir el líquido se encuentra desairado, el contenedor es liso y sin aire atrapado, la despresurización conlleva a la continuación del estado B por la isoterma teórica a un punto D, llamado "estado metaestable". Se dice que un líquido en un punto como D está en tensión, la diferencia de presión entre B y D es la magnitud de la tensión.

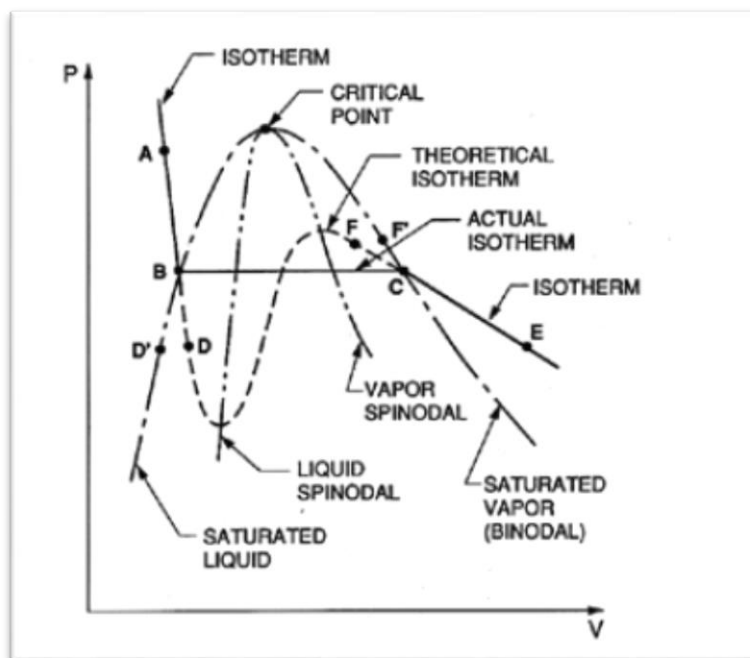


Figura 1. Diagrama P-v para cambio de fases

Fuente: (Brennen, 1995)

1.5.2. Definiciones de Cavitación Hidrodinámica

“Un líquido a temperatura constante podría ser sometido a una presión decreciente, p , que cae por debajo de la presión de vapor saturado, p_v . El valor de $p_v - p$ se denomina tensión, Δp , y la magnitud en la que se produce la rotura es la resistencia a la tracción del líquido, Δp_C . El proceso de ruptura de un líquido por disminución de la presión a una temperatura del líquido aproximadamente constante se denomina a menudo cavitación” (Brennen, 1995).

“La cavitación se corresponde a una estructura bifásica (líquido-vapor) cuando la presión del líquido disminuye hasta su presión de vapor, p_v . Esta disminución de p_v puede deberse a diversos factores relacionados con la hidrodinámica del flujo y las propiedades físicas del fluido, pudiendo presentar diferentes características” (Molla & Manuele, 2011).

“La cavitación puede definirse en general como los fenómenos de formación, crecimiento y posterior colapso de microburbujas o cavidades que ocurren en un intervalo de tiempo extremadamente pequeño (milisegundos) liberando grandes magnitudes de energía” (Gogate, 2001).

“La cavitación ocurre en líquidos cuando el valor local de la presión absoluta alcanza la llamada presión saturada de vapor. Las discontinuidades llenas de vapor pueden tener forma de burbujas, hojas, nubes, vórtices de cavitación. La apariencia y estructura de la cavitación depende fuertemente de las características hidrodinámicas del flujo (por ejemplo, el nivel de presión estática) y la geometría del dominio de flujo” (Rudolf, 2014).

La cavitación es el resultado de una ruptura del líquido debido a la caída repentina de presión hasta su presión de vapor que produce la formación, crecimiento y colapso de burbujas o cavidades. La generación y desarrollo del fenómeno de cavitación depende de las características hidrodinámicas del flujo, las propiedades del líquido, el número de Reynolds, y la temperatura del líquido.

Cabe recalcar como se encuentra representado en la Figura 1-2 la diferencia principal entre la cavitación y la ebullición según (Brennen, 1995) se distingue porque la cavitación es el proceso de ruptura de un líquido por disminución de la presión a una temperatura del líquido aproximadamente constante, mientras que la ebullición es el proceso de ruptura de un líquido mediante el aumento de la temperatura a una presión aproximadamente constante.

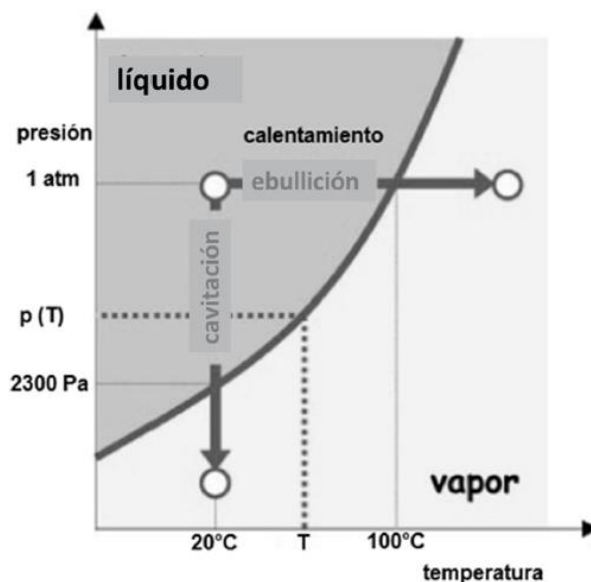


Figura 2. Diferencias entre ebullición y cavitación
Fuente: (Araujo, 2015)

1.5.3. Inicio de la cavitación

Para que la cavitación sea posible además de la caída de presión que se produce se requiere la presencia de un “contaminante” que propicie la formación de burbujas.

En condiciones ideales si tenemos un líquido puro la formación de vapor es complicada porque el líquido soportaría presiones mucho menores que la presión de saturación sin evaporarse, siendo muy difícil que se formen cavidades, debemos tener en cuenta que en la práctica todos los líquidos contienen algo de gas disuelto que es el principal mecanismo para la generación de burbujas de cavitación.

En un líquido puro, “la tensión superficial es la manifestación macroscópica de las fuerzas intermoleculares que tienden a mantener las moléculas juntas e impedir la formación de grandes agujeros” (Brennen, 1995). La presión del líquido p_∞ , exterior a una burbuja de radio R , estará relacionada con la presión interior p_B , por (Ver Anexo1).

$$p_B - p_\infty = \frac{2S}{R} \quad [1. 1]$$

Si la temperatura es uniforme y la burbuja sólo contiene vapor, entonces la presión interior p_B será la presión de vapor saturada p_v . Sin embargo, la presión del líquido exterior, $p_\infty = p_v - \frac{2S}{R}$, tendrá que ser menor que p_v con el fin de producir condiciones de equilibrio. En consecuencia, si la presión del líquido exterior se mantiene a un valor constante ligeramente inferior a $p_v - \frac{2S}{R}$ la burbuja crecerá, R aumentará y se producirá ruptura, entonces la resistencia a la tracción del líquido Δp_c , será dada por

$$\Delta p_c = \frac{2S}{R} \quad [1. 2]$$

En el agua, las microburbujas de aire parecen persistir casi indefinidamente y son casi imposibles de eliminar por completo. Debido a la contaminación del ambiente, o del experimento lograr tener un líquido completamente puro es muy complicado. Si bien es posible eliminar la mayor parte de estos núcleos de una pequeña muestra de laboratorio de investigación, sin embargo en proyectos de ingeniería los contaminantes dominan las aplicaciones.

Si la burbuja de nucleación contiene partes de gas presentes en el líquido como el esquema de la Figura 1-3, entonces la presión en la burbuja es $p_v + p_G$. Por lo tanto, la presión de equilibrio en el líquido es $= p_v + p_G - \frac{2S}{R}$ y la tensión del líquido será $\frac{2S}{R} - p_G$. Si existen grandes concentraciones de gas en el agua, es decir p_G es muy grande, no se necesitaría llegar a la presión de vapor para que se produzca el crecimiento de la burbuja.

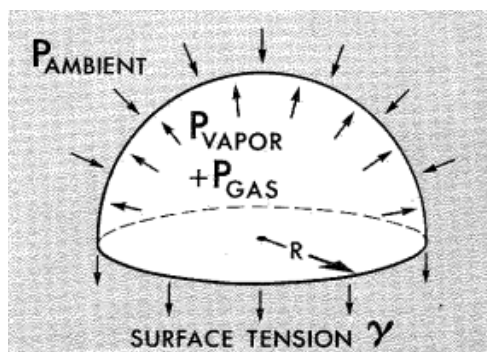


Figura 3. Fuerzas en una burbuja de cavitación

Fuente: (Eisenberg , 1964)

1.5.4. Cavitación en líquidos que fluyen

Quizás la forma más común de encontrarse con fenómenos de cavitación es en las turbomáquinas donde los efectos hidrodinámicos dan como resultado regiones del flujo donde la presión cae por debajo de la presión de vapor, siendo sus efectos indeseables por el daño de los mismos. Reynolds en 1894 fue uno de los pioneros en explicar este fenómeno realizando experimentos en un Venturi y verificando que se forman nubes de burbujas en las proximidades de la garganta.

Para los propósitos de la presente discusión consideraremos un flujo uniforme, monofásico, incompresible de una densidad ρ_L , campo de velocidad $u_i(x_i)$, y presión $p(x_i)$. En todos estos flujos es conveniente definir una velocidad de referencia U_∞ , y la presión de referencia p_∞ . Así, el coeficiente de presión es:

$$C_p(x_i) = \frac{p(x_i) - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad [1. 3]$$

Habrà alguna ubicación x_i , dentro del flujo donde C_p es mínimo, y ese valor de C_p será denotado por C_{pmin} .

En el caso idealizado (donde no existen efectos viscosos) de un líquido sin fricción, la ecuación de Bernoulli se aplica y $C_p(x_i)$ y C_{pmin} sólo dependen de la geometría de los límites de flujo y no de otros parámetros.

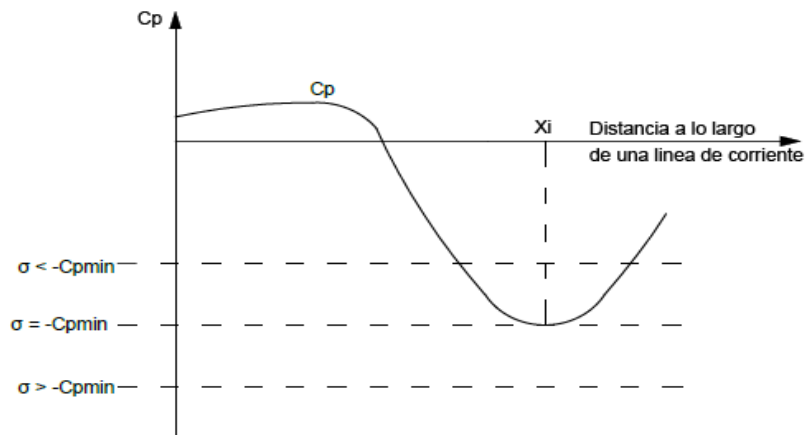


Figura 4. Diagrama de presiones a lo largo de una línea de corriente.

Para llevar esta teoría a la cavitación se plantea considerar lo que ocurre en un flujo dado cuando se disminuye la presión en un punto específico como en el caso de un tubo Venturi de manera que la presión en algún punto se aproxime a la presión de vapor p_v del líquido a una temperatura T_∞ . Esta relación es conocida como número de cavitación, σ , presentado en la ecuación 1.4, que a menudo se ha utilizado para describir la intensidad de la cavitación en el flujo a través de un tubo Venturi.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v(T_\infty)}{\frac{1}{2} \rho_L U_{th}^2} \quad [1.4]$$

Todos los flujos tienen un número de cavitación. En el primer caso identificaremos que si la p_∞ es demasiado grande en comparación con p_v se producirá un flujo de líquido monofásico, es decir el líquido no estará cavitando. Sin embargo, a medida que σ se reduce, la nucleación ocurrirá primero en algún valor particular llamado el número de cavitación incipiente y denotada por σ_i .

En el flujo hipotético de un líquido que no puede soportar ninguna tensión y en el cual las burbujas de vapor aparecen instantáneamente cuando p_{∞} alcanza p_v , quedaría

$$\sigma_i = -C_{pmin} \quad [1. 5]$$

Consideremos la nucleación de una partícula de líquido que se desplaza a lo largo de una línea de corriente como lo indica la Figura 1-4. Para $\sigma > -C_{pmin}$ la presión a lo largo de toda la trayectoria es mayor que p_v , por tal motivo en ese punto no existe flujo cavitante. Para $\sigma = -C_{pmin}$ el núcleo encuentra $p = p_v$, para ese momento infinitesimal comienza la nucleación de la burbuja. Para $\sigma < -C_{pmin}$ el núcleo experimenta $p < p_v$, en este punto se produce el crecimiento de la burbuja y conforme aumenta la presión la burbuja experimentará el colapso.

1.5.5. Factores determinantes para el inicio de la cavitación

Los flujos que se tratan comúnmente en cavitación son flujos turbulentos, además viscosos por lo tanto el valor de C_{pmin} será una función del número de Reynolds.

En resumen, según (Brennen, 1995), la predicción de la cavitación es algo muy complicado de determinar, por lo tanto depende de los siguientes parámetros dentro del experimento para que sea controlada.

1. El número de cavitación.
2. El número de Reynolds, Re
3. La temperatura del líquido, T_{∞}
4. La calidad del líquido, donde se incluye la cantidad de gas disuelto y la turbulencia del flujo.

5. La calidad de las superficies sólidas y salientes, incluida la rugosidad, ya que esto puede afectar a la hidrodinámica.

Una vez que se ha establecido la cavitación, los fenómenos que ocurren son menos sensibles a factores especiales, como el contenido del núcleo. Por lo tanto, el fenómeno se torna más controlable.

1.5.6. Patrones de Cavitación

1.5.6.1. Cavitación de burbujas de viaje

Este patrón de cavitación se identifica principalmente en tuberías por donde viaja un fluido transportando núcleos de cavitación típicos. Estos son invisibles en el volumen líquido pero se convierten en burbujas de cavitación a medida que pasan por regiones donde la presión cae por debajo de la presión de vapor.

Las burbujas comienzan como núcleos de tamaño micrométrico en el fluido y aumentan su tamaño mientras atraviesan regiones de recuperación de la presión, para experimentar una fase de colapso aguas abajo. Los casos más comunes donde se presenta este tipo de cavitación son las placas orificio y los tubos Venturi como se muestra en la Figura 1-5.

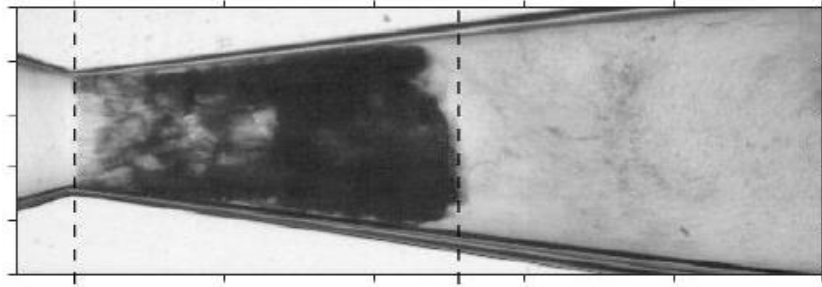


Figura 5. Cavitación de burbujas de viaje en un Venturi
Fuente: (Hogendoorn, 2017)

1.5.6.2. *Cavitación de Vórtice*

Este patrón de cavitación es muy común en turbomáquinas o en casos prácticos de ingeniería donde los flujos manejan regiones de vorticidad concentrada donde debido a fuerzas centrífugas la presión en el núcleo del vórtice es a menudo significativamente menor que en el resto del flujo, donde se produce la cavitación. Tal es el caso, por ejemplo, la cavitación generada en los vórtices de punta de las hélices de la nave como se indica en la Figura 1-6 o impulsores de una bomba o en el flujo giratorio del tubo de aspiración en una turbina de agua.

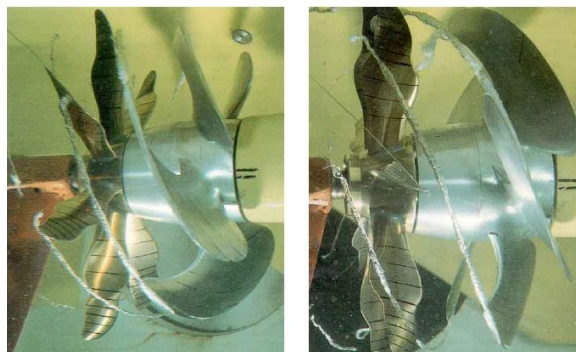


Figura 6. Vórtices generando cavitación en las palas de una hélice.
Fuente: (Brennen, 1995)

1.5.6.3. *Cavitación de la lámina*

La cavitación de la lámina es un patrón de cavitación donde existe una región de vapor que permanece aproximadamente en la misma posición con respecto al perfil en el cual se está realizando la experimentación, se puede observar como las burbujas se pegan a la pared de forma casi permanente, pareciendo estar unidos a la lámina como indica la Figura 1-7. La presión en la cavidad de la lámina estará próxima a la presión de vapor de equilibrio y la superficie de la cavidad puede considerarse como una superficie libre.

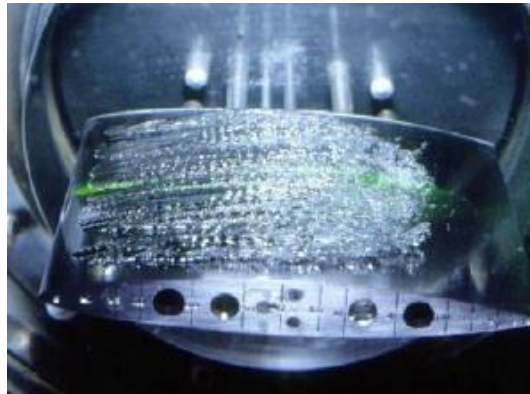


Figura 7. Cavitación de lámina en un hidroplano.

Fuente: (Franc, 2006)

1.5.7. *Ecuación de Rayleigh-Plesset*

Considerando una burbuja esférica como indica la Figura 1-8, en la cual: $R(t)$ es el radio de la burbuja en un dominio infinito de líquido T_∞ y P_∞ son la temperatura y presión lejos de la burbuja. La temperatura T_∞ es asumida como constante, ya que no se va a considerar fuentes de calor o radiación. P_∞ , se asume como una entrada conocida, la cual regula el crecimiento y colapso de la burbuja.

Para el presente desarrollo, se asume la densidad del líquido, ρ_L , como constante; es decir, el líquido es incompresible. Además, la viscosidad dinámica, ν_L , se asume constante y uniforme. También se va a considerar que los contenidos de la burbuja son homogéneos y que la temperatura, $T_B(t)$, y presión, $P_B(t)$, dentro de la burbuja son siempre uniformes.

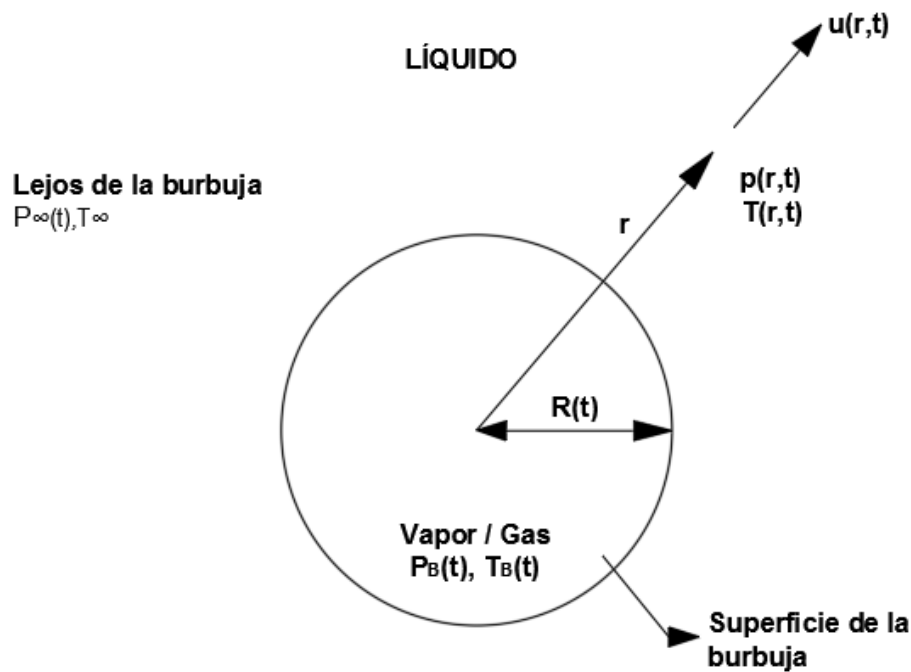


Figura 8. Esquema de una burbuja esférica en un líquido infinito

La ecuación generalizada de Rayleigh-Plesset para la dinámica de la burbuja queda expresada como (Ver Anexo 1).

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_L} = R \frac{D^2 R}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{DR}{Dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{DR}{Dt} + \frac{2S}{\rho_L R} \quad [1. 6]$$

1.5.8. Definición de bacterias

Las bacterias son microorganismos con una célula única (unicelulares) relativamente simples. Dado que su material genético no está encerrado por una membrana nuclear especial, las células bacterianas se denominan procariontes, de las palabras griegas que significan prenúcleo. Las bacterias están recubiertas por paredes celulares que en gran parte están constituidas por un complejo de hidrato de carbono y proteína denominado peptidoglucano, al contrario de lo que sucede con las paredes celulares de las plantas y las algas, cuya sustancia principal es la celulosa (Tortora, Funke, & Case, 2007).

1.5.8.1. Formas y disposiciones de las bacterias

Las tres formas más comunes de células bacterianas son: coco (esférica, de la palabra griega para semilla / baya), bacilos (significa pequeños bastones), y espirilos (forma curva, de espiral). Hay varias maneras de subdividir estas tres formas generales basadas principalmente en cómo están organizadas en arreglos multicelulares. La figura 1-9 ofrece una visión general de las diversas morfologías bacterianas (Siegel, 2011).

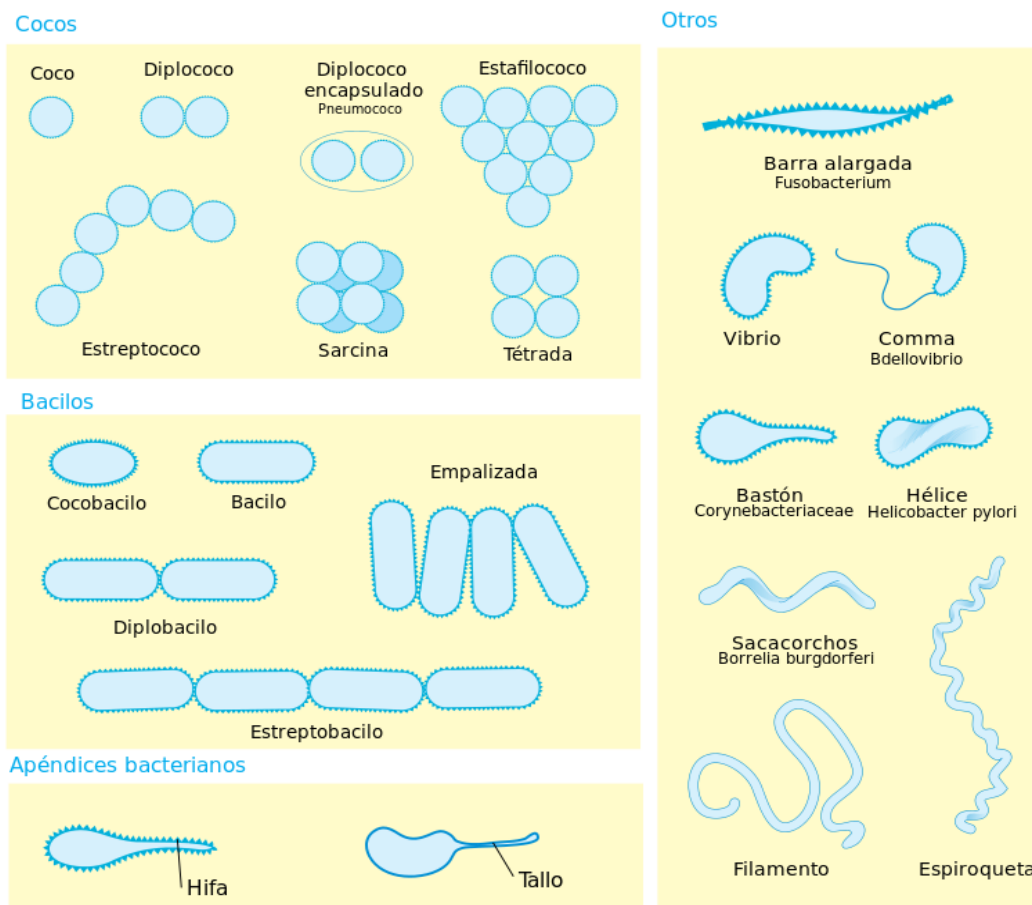


Figura 9. Disposiciones de los cocos, bacilos y otras formas bacterianas.

Fuente: (Ruiz, 2013)

1.5.9. Tinción diferencial (Tinción de Gram)

La tinción es un método mediante el cual se fija y tiñe los microorganismos, con el fin de resaltar sus características morfológicas y conservarlos para su análisis. La tinción de Gram se considera un método diferencial ya que divide a las bacterias en dos clases: Gram negativas y Gram positivas, basándose en cómo se tiñe su pared celular. Las bacterias Gram positivas se tiñen de azul púrpura y las Gram negativas se tiñen de rojo. Se cree que la diferencia entre los dos grupos se debe a una pared celular de peptidoglucano mucho mayor en Gram positivas.

1.5.9.1. Bacterias Gram negativas

Las bacterias Gram negativas tienen una pared celular bastante compleja. Primeramente, se encuentra una pequeña capa de peptidoglucano (7-8 nm), seguida de una membrana adicional, la membrana citoplasmática externa, formada por lípidos, proteínas y polisacáridos. Existen en forma de esferas, óvalos, bacilos rectos o curvos, hélices o filamentos. Pueden ser móviles o inmóviles, y no son capaces de formar esporas (Lowy, 2009).

1.5.9.2. Bacterias Gram positivas

Las bacterias Gram positivas tienen una pared celular homogénea y gruesa (de 20 a 80 nm) compuesta principalmente por peptidoglucano. Algunas bacterias Gram positivas pueden formar esporas en condiciones ambientales estresantes, por ejemplo, cuando escasean los nutrientes. Existen en forma de esferas, bacilos o filamentos; y con mayor frecuencia son inmóviles. Debido a su gruesa capa de peptidoglucano, la pared celular de las bacterias Gram positivas es más fuerte que las Gram negativas.

1.5.10. Endospora

Algunas bacterias Gram positivas pueden formar una estructura latente y especialmente resistente llamada endospora, a través del proceso conocido como esporulación representado en la Figura 1-10. Las endosporas se desarrollan dentro de las células bacterianas vegetativas de varios géneros: *Bacillus* y *Clostridium* (varillas), *Sporosarcina* (cocci) y otras. Estas estructuras son extraordinariamente resistentes a varios agentes medioambientales, como el calor, la radiación ultravioleta, la radiación

gamma, los desinfectantes químicos y desecación. De hecho, algunas endosporas han permanecido viables durante alrededor de 100,000 años. Debido a su resistencia y al hecho de que varias especies de bacterias formadoras de endosporas son patógenos peligrosos, las endosporas son de gran importancia práctica en la microbiología alimentaria, industrial y médica. Las endosporas a menudo sobreviven durante varias horas a la ebullición. La posición de las esporas en la célula madre o esporangio con frecuencia difiere entre las especies, por lo que tiene un valor considerable en la identificación. Las esporas pueden estar localizadas centralmente, cerca de un extremo (subterminal) o definitivamente terminales como se muestra en la Figura 1-11. A veces, una spora es tan grande que hincha el esporangio. (Prescott, Harley, & Klein, 2002).

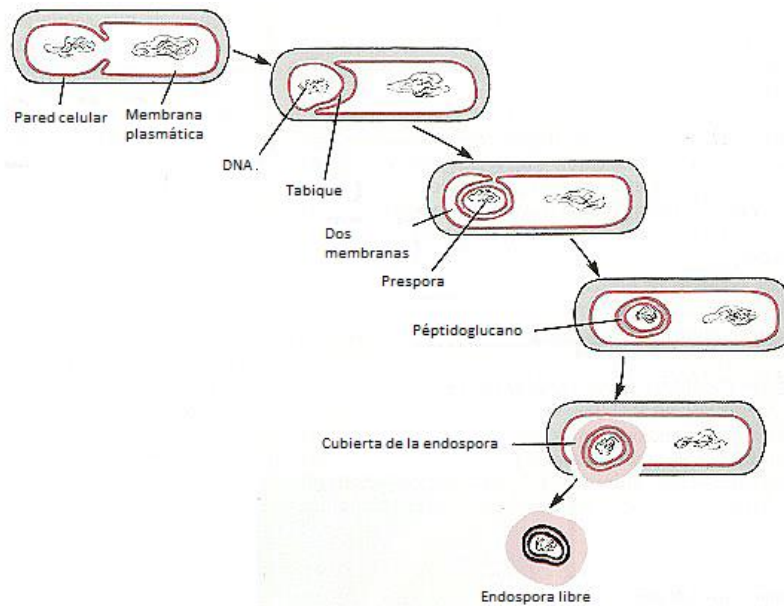


Figura 10. Formación de endosporas por esporulación

Fuente: (Salamanca, 2003)

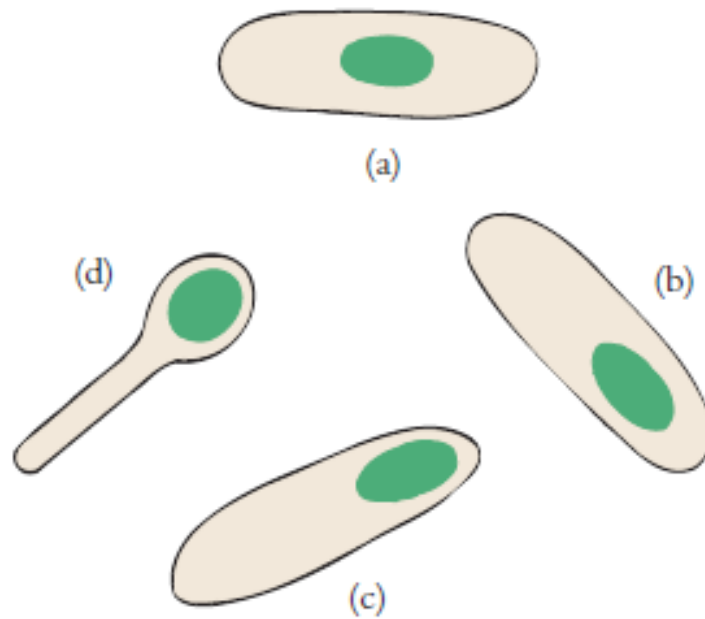


Figura 11. Ejemplos de localización y tamaño de las endosporas

Fuente: (Prescott, Harley, & Klein, 2002)

1.5.11. Desinfección

Desinfección es el proceso de tratamiento mediante el cual se elimina los agentes microbianos patógenos presentes en el agua, suprimiendo o reduciendo el riesgo de enfermedad que pueden presentar. La destrucción y/o desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento de los mismos. Es un término relativo, donde existen diversos niveles de desinfección, ya sea total, o una mínima reducción del número de microorganismos contaminantes.

1.5.12. Esterilización

Esterilización describe el proceso mediante el cual se destruye o elimina todas las formas de vida microbiana. Se trata de un término absoluto, donde un objeto está estéril o no lo está, sin rangos intermedios.

1.5.13. Potabilización del agua

La potabilización consiste en eliminar o inactivar los microorganismos patógenos a niveles seguros para el consumo humano. Si estos microorganismos no son eliminados, el agua no es potable y es susceptible de causar enfermedades. La desinfección del agua pública constituye una medida preventiva esencial para la salud pública. (NTE INEN 1108).

1.5.14. Contaminantes del agua

Para hablar de purificación de agua se hace necesario identificar la fuente del agua y los contaminantes que se desea eliminar de la misma. Los siguientes son algunos de los mayores contaminantes en lo que se refiere a purificación del agua:

- La turbidez que hace referencia a sólidos suspendidos, no es deseable por consideraciones estéticas ya que los sólidos pueden contener metales pesados, patógenos u otros contaminantes; además disminuye la efectividad de las técnicas de tratamiento de agua al proteger a los patógenos del daño químico o térmico, o en el caso del tratamiento con UV (ultravioleta), absorbiendo la luz UV en sí misma.

- Compuestos orgánicos: el agua puede estar contaminada por una serie de compuestos orgánicos, como cloroformo, gasolina, pesticidas y herbicidas de una variedad de operaciones o aplicaciones industriales y agrícolas.
- Patógenos: estos incluyen protozoos, bacterias y virus. Los protozoos son los patógenos más grandes en el agua potable (en tamaño), el rango de los protozoos es de 2 a 15 μm . Las bacterias son más pequeñas que los protozoos y son responsables de muchas enfermedades, como la fiebre tifoidea, el cólera, la diarrea y la disentería. Las bacterias patógenas varían en tamaño de 0,2 a 0,6 μm . Los virus son otro patógeno problemático. Al igual que con los protozoos, la mayoría de las enfermedades víricas transmitidas por el agua no presentan un peligro letal para un adulto sano. Los virus patógenos transmitidos por el agua varían en tamaño desde 0.020-0.030 μm , y son demasiado pequeños para ser filtrados por un filtro mecánico. Todos los virus entéricos transmitidos por el agua que afectan a los seres humanos provienen exclusivamente de humanos, por lo que los desechos animales no presentan una gran amenaza viral. (Cheremisinoff, 2002)

1.5.15. Métodos de desinfección

La desinfección del agua se puede lograr mediante diversos procesos químicos y físicos. Los procesos químicos comprenden el tratamiento del agua con halógenos, ozono, enzimas y cationes plateados, mientras que los procesos físicos comprenden el tratamiento térmico, la aplicación de ultrasonidos y la radiación electromagnética, como

los rayos ultravioleta, los rayos X, la radiación γ , la filtración mecánica para retener bacterias y ósmosis inversa. (Pandit & Kumar, 2013).

La selección de los procesos y maquinarias adecuadas, y sus combinaciones, dependen de factores como:

1. Cuán limpio debe ser el efluente final de agua de nuestra planta;
2. Las cantidades y naturaleza del agua afluente que necesitamos tratar;
3. Las propiedades físicas y químicas de los contaminantes que necesitamos eliminar o neutralizar en el agua del efluente;
4. Las propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los desechos sólidos generados por el tratamiento del agua; y
5. El costo del tratamiento del agua, incluido el costo de tratar, procesar y encontrar un hogar para los desechos sólidos.

1.5.16. Desinfección química

Los desinfectantes químicos son agentes antimicrobianos que matan o inhiben el crecimiento de microorganismos. Existen dos grupos de agentes antimicrobianos: agentes de tipo oxidante y no oxidante. Los agentes oxidantes incluyen cloro, cloraminas, dióxido de cloro, cloruro, bromuro, bromo, ozono y peróxido de hidrógeno. Los agentes no oxidantes comprenden formaldehído, isotiazalonas, isocianatos, compuestos de amonio cuaternario y fenoles clorados. En general, los agentes antimicrobianos químicos matan a los microbios al actuar sobre la pared celular o en contra de los sistemas enzimáticos que soportan la actividad metabólica de los microbios. (Cheremisinoff, 2002).

1.5.16.1. Cloración

La cloración es el método de desinfección de agua más común que se ha utilizado durante varias décadas a nivel mundial. Se usa principalmente para destruir los microorganismos patógenos en el agua. Los desinfectantes a base de cloro son los únicos desinfectantes que brindan protección residual duradera para proteger el agua de enfermedades transmitidas por el agua en toda la red de distribución, desde la planta de tratamiento hasta el grifo del consumidor. Sin embargo, presenta una importante desventaja, ya que reacciona con los ácidos húmicos y fúlvicos de origen natural en el agua para producir trihalometanos (THM), que son tóxicos por naturaleza.

El agua que contiene THM, si se consume, puede tener un efecto letal ya que es cancerígeno. Este inconveniente crítico del cloro condujo a una búsqueda exhaustiva de desinfectantes alternativos que no produjeran subproductos de desinfección dañinos (Pandit & Kumar, 2013).

El cloro es muy tóxico para algunas especies vivientes en las concentraciones empleadas para desinfección del agua y existen regulaciones ambientales que no permiten desechar aguas cloradas al medio ambiente (ríos, lagos y lagunas), ya que dañan algunas especies acuáticas principalmente los peces.

1.5.16.2. Ozono

El ozono, una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno, se forma al exponer el aire o el oxígeno a un arco eléctrico de alta tensión. El ozono es mucho más efectivo como desinfectante que el cloro y es particularmente efectivo contra esporas y quistes, pero no existen niveles residuales de desinfectante después de que el ozono vuelve a

convertirse en O₂. Si no hay desinfectante residual presente (como sucedería si se usara ozono como el único método de tratamiento), estos microorganismos causan que la calidad del agua se deteriore rápidamente durante el almacenamiento y la distribución. La ozonización no proporciona residuos germicidas o de desinfección para inhibir o prevenir el rebrote (Edzwald, 2011).

Mientras que la ozonificación permite desinfectar el agua de manera más efectiva que el cloro, tiene costos operativos y de equipo muy elevados y puede ser más difícil encontrar un profesional competente en el tratamiento del ozono y el mantenimiento del sistema. El ozono es menos soluble en agua, en comparación con el cloro, y, por lo tanto, se necesitan técnicas especiales de mezcla. Posibles riesgos de incendio y problemas de toxicidad asociados con la generación de ozono.

1.5.17. *Mecanismos de destrucción de bacterias por cavitación*

La cavitación tiene un gran potencial para ser utilizada en diversos campos. Entre las varias aplicaciones, uno de los usos importantes es la ruptura de las células biológicas.

La cavitación connota un colapso de burbuja relativamente violento en el que se producen puntos calientes localizados de alta temperatura y presiones en ráfagas muy cortas (del orden de microsegundos) en el medio. Estas ráfagas pueden ir acompañadas de ondas de choque localizadas y la generación de radicales químicos altamente reactivos.

Los efectos significativos que conducen a una inactivación de microorganismos por cavitación hidrodinámica están determinados por:

1. Efectos mecánicos: mediante la formación de remolinos, vórtices y flujos reentrantes a diferentes escalas de tamaño. Estos fenómenos producen una diferencia de presión en las paredes de las células. Cuando esto excede la resistencia de la pared celular, la célula se rompe.
2. Esfuerzo de cizalladura: las ondas de choque resultantes de eventos de cavitación transitoria pueden dar lugar a tensiones de cizalladura localizadas. Como se maneja un flujo turbulento y, en consecuencia, gradientes de alta velocidad en áreas localizadas, esto resulta en un aumento de las tensiones de corte que hacen que la célula se rompa.
3. Ataque de radicales libres: los posibles mecanismos por los que las células se vuelven inviables incluyen el ataque de radicales libres (von Sonntag, 1986), incluido el ataque de radical hidroxilo (OH) y la disrupción física de las membranas celulares. Una vez que la membrana celular se desprende (una consecuencia física de la implosión de las burbujas), los oxidantes químicos pueden entrar en la célula y atacar las estructuras internas, o se pueden liberar fluidos vitales de la célula y se degradan en la solución. Según (Medina & Valencia, 2008) el radical hidroxilo OH es altamente reactivo y muy tóxico para los microorganismos, repercutiendo de manera irremediable en los siguientes componentes celulares.
 - Oxidación de los diferentes aminoácidos, dando lugar a una pérdida de la capacidad de la proteína correspondiente y las moléculas adecuadas para cumplir su función.
 - Actúa sobre los lípidos que afecta la membrana celular aumentando la rigidez y produciendo pérdida en su permeabilidad.

- Actúa sobre la cadena de ADN produciendo alteraciones químicas en las bases nitrogenadas o ruptura de la cadena.
4. Desaglomeración: la cavitación puede facilitar la dispersión de los grupos de microorganismos en solución y así aumentar la eficacia de otros desinfectantes químicos.
 5. Efectos del calor: generación de puntos calientes localizados (condición de temperatura y presión muy altas localmente).

2. CAPÍTULO

DESARROLLO DEL EQUIPO Y PROTOCOLO DE PRUEBAS

2.1. Descripción del banco de pruebas hidrodinámico

El banco de pruebas fue diseñado para la generación de cavitación hidrodinámica a través de un Tubo Venturi, el equipo se encuentra instalado sobre una estructura metálica como se muestra en la Figura 2-1 y consta de los elementos de la tabla 2-1. Todos los elementos se encuentran conectados mediante tubería PVC y mangueras de alta presión para producir la recirculación del flujo.

Tabla 1

Elementos que conforman el banco de pruebas

Elementos	Rango medición
Rotámetro	0 a 100 (lpm)
Manómetro	1 a 6 (bar)
Vacuómetro	-1 a 1 (bar)
Manovacúmetro	-5 a 5 (psi)
Tubo Venturi	
Bomba centrífuga	
Válvula de compuerta	
Tanque almacenamiento	

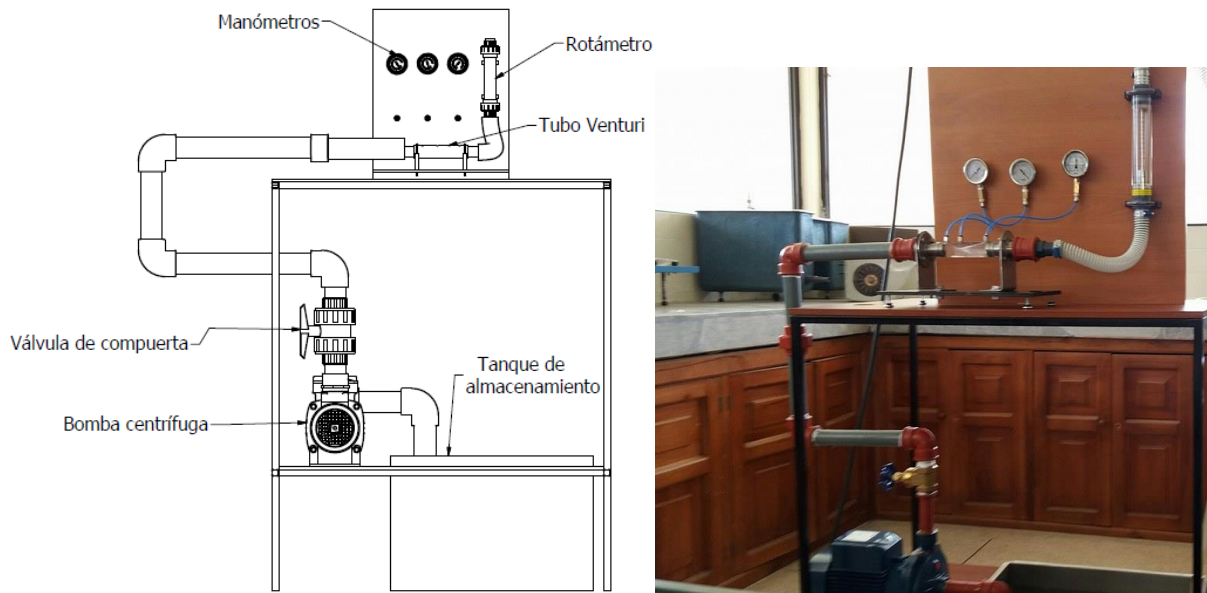


Figura 12. Banco de pruebas de cavitación hidrodinámica

2.2. Diseño del Tubo Venturi

Los Venturis son dispositivos que tienen el papel principal del control del caudal másico. El tubo convergente es un dispositivo eficaz para convertir la cabeza de presión en velocidad, mientras que el tubo divergente convierte la cabeza de velocidad a la cabeza de presión. Los dos se pueden combinar para formar un tubo Venturi, nombrado después Venturi, en honor a su inventor. Fue aplicado a la medida del agua por Clemens Herschel en 1886. Como se muestra en la Figura 2-2, consiste en un tubo con una garganta estrecha que produce una velocidad aumentada acompañada de una reducción de la presión, seguida por una porción gradualmente divergente en la que la velocidad se transforma de nuevo en presión con una pérdida por fricción.

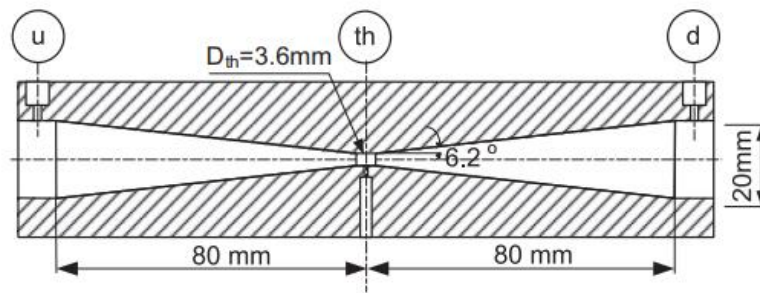


Figura 13. Tubo Venturi
Fuente: (Niedźwiedzka & Sobieski, 2016)

La presión disminuye en la sección convergente y aumenta en la sección divergente

- Con la disminución de la presión aguas abajo, la presión en la garganta alcanza la presión de vapor (cavitaciones incipientes)
- Con una reducción adicional de la presión aguas abajo, se extiende el estado de dos fases (flujo de cavitación)
- La burbuja de vapor se derrumba más abajo y el flujo se convierte en una fase

Los tubos Venturi son el dispositivo más común para generar una caída de presión.

“La sección divergente se puede modificar esencialmente cambiando el ángulo de divergencia. A primera vista se podría pensar que los ángulos más grandes conducen a desaceleraciones más rápidas y, por tanto, a una recuperación más rápida de la presión, pero la situación es más bien lo contrario. Las divergencias abruptas producen el desprendimiento de la capa límite y por lo tanto remolinos y recirculaciones. Como resultado de este efecto, las pérdidas de presión aumentan, y la recuperación de la presión disminuye proporcionalmente” (Benito & Arrojo, 2005).

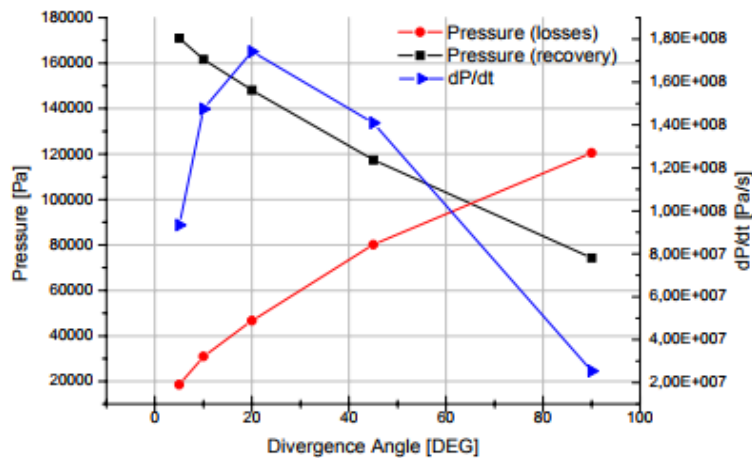


Figura 14 Tasa de cambio de presión para diferentes ángulos de divergencia
Tomado de: (Benito & Arrojo, 2005)

Por lo tanto, el intento de obtener una recuperación abrupta de la presión aumentando el ángulo de divergencia da lugar a una menor recuperación de presión y menor velocidad de cambio de presión.

Según la investigación realizada por (Benito & Arrojo, 2005), mostrada en la Figura 2-3 los mejores ángulos de divergencia para que un tubo Venturi tenga un cambio de presión adecuado son los ángulos entre 10° y 30° . Para nuestro diseño se optó por el ángulo de 20° , que presenta el mejor cambio de presión.

El tubo Venturi está hecho de polimetilmetacrilato (PMMA), que es más conocido como perspex o acrílico. La propiedad más importante de este material es la alta transmisión de luz, que brinda la capacidad de acceso óptico a la dinámica de cavitación. La geometría exacta de Venturi se presenta en la Figura 2-4, donde la dirección del flujo es de izquierda a derecha.

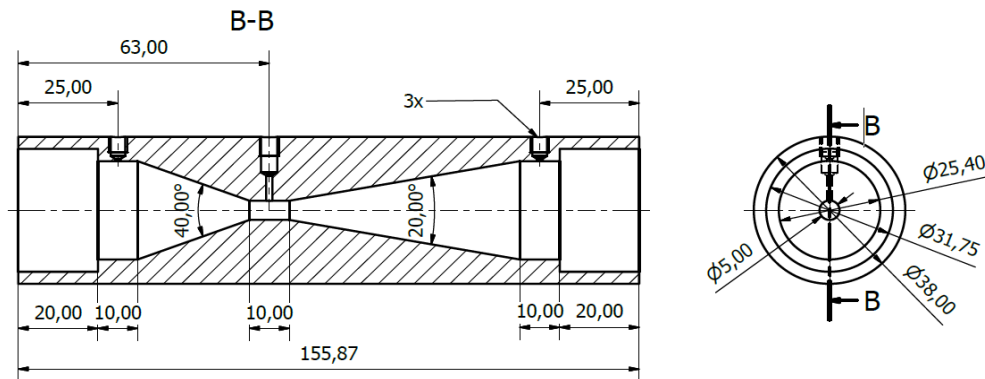


Figura 15. Geometría exacta del Tubo Venturi para experimentación

2.3. Cálculos de diseño.

Las ecuaciones utilizadas para este modelo son válidas para flujos estables e incompresibles. En la Figura 2-5 se encuentra representado las secciones en el Venturi para el análisis de cavitación.

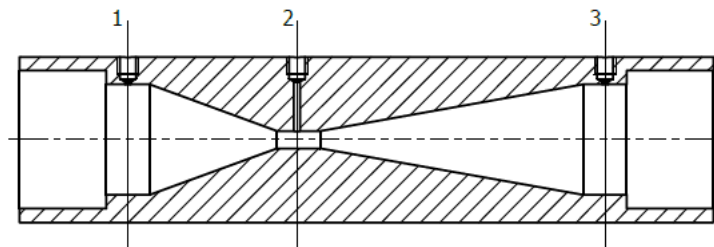


Figura 16. Secciones del Venturi para cavitación

Teniendo los siguientes datos iniciales para nuestra experimentación:

$$\rho_{agua} = 1000 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$T_{agua} = 293 (K)$$

Flujo volumétrico

$$Q = 0.0005 \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

Diámetro inicial del Venturi

$$d_1 = 0.0254 \text{ (m)}$$

Diámetro en la garganta del Venturi

$$d_2 = 0.005 \text{ (m)}$$

Área al inicio del Venturi

$$A_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 5.067 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

Área en la garganta del Venturi

$$A_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 1.963 \times 10^{-5} \text{ (m}^2\text{)}$$

Presión de entrada

$$P_1 = 300000 \text{ (Pa)}$$

“La presión de vapor del agua depende de la temperatura del agua según la ecuación de Clausius-Clapeyron modificada” (Rudolf, Hudec, Gríger, & Štefan, 2014)

$$p_{v_{agua}} = 100e^{53.67957 - \frac{6743.69}{T_{agua}} - 4.8451 \ln(T_{agua})} = 2.333 \times 10^3 \text{ (Pa)}$$

La relación del flujo volumétrico, Q , para un fluido incompresible a través de una sección de superficie de control está dado por

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad [1. 7]$$

La ecuación de conservación de la masa para un volumen de control en su forma diferencial se encuentra definida como

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad [1.8]$$

Para un flujo estacionario donde ninguna de las propiedades varía con respecto al tiempo tenemos que la ecuación de conservación de masa queda definida como

$$0 = \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad [1.9]$$

De acuerdo a (Niedźwiedzka & Sobieski, 2016) el flujo másico dentro de un Venturi Cavitante se mantiene constante.

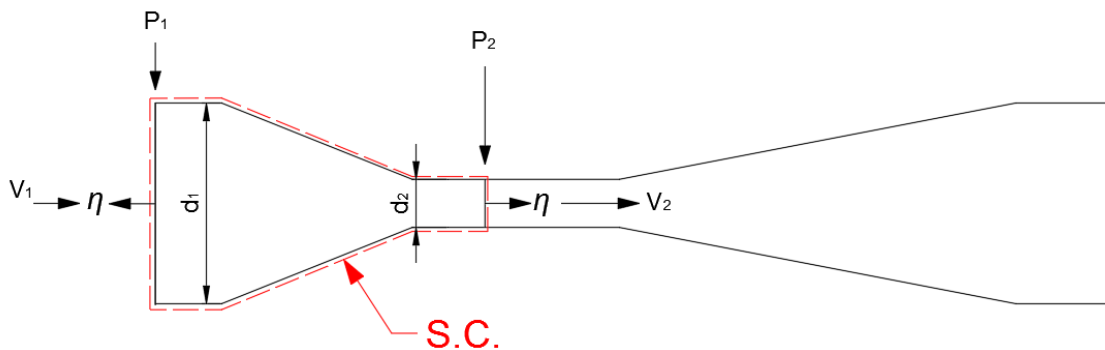


Figura 17. Superficie de control en un tubo Venturi

El tubo Venturi como se indica en la Figura 2-6 tiene a la entrada un diámetro d_1 , una presión P_1 y una velocidad V_1 promedio que tiene un vector normal a la superficie contrario a V_1 ; y en la garganta tiene un diámetro d_2 , una presión P_2 y una velocidad V_2 promedio que tiene un vector normal a la superficie en el mismo sentido que V_2 .

Aplicando la ecuación de conservación de la masa a la entrada y una salida de flujo a la superficie de control; advirtiéndose que en el punto 1 la masa está fluyendo para adentro, mientras que en el punto 2 la masa está fluyendo para afuera de la superficie de control.

$$0 = - \int_{A_1} \rho \vec{V}_1 \cdot d\vec{A}_1 + \int_{A_2} \rho \vec{V}_2 \cdot d\vec{A}_2$$

Considerando un flujo incompresible y estacionario se verifica que

$$\rho \vec{V}_1 \cdot \vec{A}_1 = \rho \vec{V}_2 \cdot \vec{A}_2$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad [1. 10]$$

La ecuación de Bernoulli se encuentra definida para flujos incompresibles, estables y a lo largo de una línea de corriente como

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho_{agua} \cdot g} + h_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho_{agua} \cdot g} + h_2 \quad [1. 11]$$

Encontrando la velocidad en la garganta del Venturi

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Sabiendo que el caudal másico se conserva de acuerdo a la ecuación 1.10, obtenemos que la velocidad teórica es

$$V_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Para que la velocidad sea real tenemos en cuenta las consecuencias provocadas por el efecto de la vena contracta y de la turbulencia resumidas en el coeficiente de descarga, Cd. Este parámetro adimensional es función de la geometría y del número de Reynolds.

La forma de calcular este parámetro es estrictamente experimental. Resumiendo, la velocidad real en el tubo Venturi quedaría expresada como

$$V_{2r} = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

El caudal real se obtiene multiplicando por la sección

$$Q_r = \frac{C_d A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad [1. 12]$$

Reemplazando el caudal de la experimentación, la geometría del Tubo Venturi y un coeficiente de descarga $C_d = 0.94$ de acuerdo a (Benito & Arrojo, 2005) obtenemos la presión en la garganta.

$$P_2 = -70000 \text{ (Pa)}$$

Con esta presión se obtiene una intensidad de cavitación igual a $\sigma = 0.22$. Según (Gogate P. , 2001), para un número de cavitación comprendido entre $0.15 < \sigma < 0.3$, el fenómeno se encuentra totalmente desarrollado, validando el diseño.

2.4. Caídas de presión en el equipo de cavitación hidrodinámica

La pérdida de carga mayor para un fluido incompresible que se desarrolla turbulentamente en un conducto transversal de área constante es.

$$h_{mayor} = \lambda \left(\frac{L_{tubería}}{D_{tubería}} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad [1. 13]$$

Donde tenemos los siguientes datos del banco de pruebas:

$$d_{tubería} = 0.03175 \text{ (m)}$$

Área tubería

$$A_{tubería} = \frac{\pi \cdot d_{tubería}^2}{4} = 7.917 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

De la ecuación de continuidad obtenemos la velocidad del flujo en la tubería.

$$V_{tubería} = \frac{Q}{A_{tubería}} = 0.632 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

Con la velocidad de flujo en la tubería, se calcula el número de Reynolds que permite identificar el régimen de flujo.

Viscosidad dinámica del agua $\mu_{agua @ 20 \text{ C}} = 0.001 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$

$$Re_{tubería} = \frac{\rho_{agua} \cdot V_{tubería}^2 \cdot d_{tubería}}{\mu_{agua}} \quad [1. 14]$$

$$Re_{tubería} = 1.266 \times 10^4$$

El régimen del flujo es turbulento

$$Re_{tubería} = 2.14 \times 10^4 > 4000$$

La rugosidad de la tubería, siendo el material plástico PVC es (Ver Anexo 2).

$$\varepsilon_{tubería} = 0.0015 \text{ (mm)}$$

Utilizando las iteraciones propuestas por la ecuación de Colebrook-White, para encontrar el factor de fricción

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot \varepsilon_{tubería}}{d_{tubería}} + \frac{18.7}{Re_{tubería} \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad [1. 15]$$

El factor de fricción encontrado de manera iterativa está dado por

$$\lambda = 0.0292$$

La pérdida de carga se encuentra de la siguiente manera

$$L_{tubería} = 897 \text{ (mm)}$$

$$h_{f_{mayor1}} = \lambda \frac{L_{tubería}}{d_{tubería}} \cdot \frac{V_{tubería}^2}{2g} = 0.017 \text{ (m)}$$

Se debe añadir a esta pérdida de carga la obtenida el tubo Venturi al estrangular el flujo expresando la pérdida de carga mayor total como

$$h_{f_{mayort}} = h_{f_{mayor1}} + h_{f_{mayorv}} = 0.017 \text{ (m)} + 7.22 \text{ (m)} = 7.24 \text{ (m)}$$

Las pérdidas menores por accesorios presentes en el sistema se deben a los cambios de dirección y velocidad del fluido en válvulas, aberturas, codos, entre otros.

La longitud equivalente de pérdidas menores debido al cierre y abertura de la válvula de compuerta y a tres codos de 90° se encuentra especificadas en el (Anexo 2). Obteniendo el siguiente resultado.

$$h_{f_{menor}} = (K_{Lcodos} + K_{Lválvula}) \cdot \frac{V_{tubería}^2}{2g} = 0.44 \text{ (m)}$$

Para selección la bomba, se aplica la ecuación 1.16 donde se encuentra especificado todas las pérdidas de carga para determinar la altura de bombeo.

$$h_{bombeo} = \frac{P_1}{\rho_{agua} \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} + h_{geométrica} + h_{fmayort} + h_{fmenor} \quad [1. 16]$$

$$h_{bombeo} = \frac{3 \times 10^5 (Pa)}{1000 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 9.77 \left(\frac{m}{s^2} \right)} + \frac{0.821^2 \left(\frac{m^2}{s^2} \right)}{2 \cdot 9.77 \left(\frac{m}{s^2} \right)} + 0.7 (m) + 7.24 (m) + 0.44 (m)$$

$$h_{bombeo} = 39.6 (m)$$

2.5. Mediciones realizadas en el banco de pruebas

Las mediciones que se realizaron se dividieron en dos partes principales: la primera es una medición a diferentes intensidades de cavitación para comprender el comportamiento físico de este fenómeno, la segunda se refiere a todas las mediciones realizadas para la desinfección de aguas residuales.

2.5.1. Configuración y preparación del equipo

Para el desarrollo de todos los experimento se tomaron mediciones de flujo volumétrico y de presión a diferentes posiciones del tubo Venturi: la primera de alta presión, se encuentra aguas arriba de la garganta, la segunda, colocada en la garganta, que necesita de un vacuómetro debido a la caída de presión que se produce en esta zona, y la tercera, aguas abajo, cuenta con un manovacuómetro de baja presión ya que en este punto la presión no rebasa los ± 5 psi. Se utilizó una bomba centrífuga con una potencia de 2 HP marca Pedrollo modelo CP 660 (Ver Anexo 3) para impulsar el fluido, y las conexiones de los manómetros con el Venturi se realizaron mediante mangueras de poliuretano.

2.5.2. Mediciones del comportamiento físico de la cavitación hidrodinámica

Se realizaron 5 mediciones para caracterizar el comportamiento del suceso a diferentes intensidades. A través de la válvula de compuerta se estrangula el flujo para obtener distintas presiones de entrada aguas arriba del Venturi; al mismo tiempo que se obtienen las mediciones de caudal y presión; con la cámara de alta velocidad Phantom V2512 (Ver Anexo 4) se adquiere imágenes de video a 110000 fps.

Para el número de cavitación menor, donde la intensidad del fenómeno se magnifica, se realizó una toma de datos del cambio de temperatura, que servirá como componente para desarrollar un balance energético.

2.5.3. Experimento de desinfección de agua residual

Para asegurar presencia de bacterias en el agua a realizar la desinfección se tomó agua del río Santa Clara que es un río que presenta un mal olor, aguas grises y mala apariencia como se indica en la Figura 2-7 por la cantidad de desechos eliminados al río a causa de los hogares aledaños al sector. Para este punto es importante aclarar que si el caudal del río ha aumentado debido a lluvias es muy probable que la concentración de bacterias por unidad de volumen disminuya; por lo que, la extracción del agua se hizo en días en los que el caudal del río fuese similar, guiándonos por el nivel de altura del agua.

Se contó con bidones de agua, previamente desinfectados y se accedió al río a la altura de la calle “Grupo Yaguachi” tomando los respectivos cuidados como guantes, gel y alcohol desinfectante.

El procedimiento se lleva a cabo inmediatamente después de recolectada el agua, sin dejar pasar más de 30 minutos en su transporte y colocación en el equipo de cavitación.

Se contó con frascos esterilizados para la toma de muestras, haciendo la primera toma antes de arrancar el equipo. Posteriormente se enciende la bomba y se programa a una medición de caudal y presión fija, lo que viene asociado con una intensidad de cavitación, dejándolo en marcha durante 65 minutos y tomando muestras en los minutos 10, 20, 30, 45 y 65.



Figura 18. Mala apariencia del Río Santa Clara

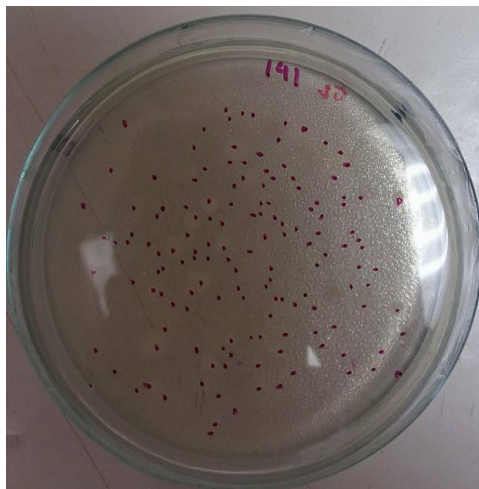


Figura 19. Conteo del número de unidades formadoras de colonias

3. CAPÍTULO

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultados obtenidos de los procesos de experimentación

Los resultados de la experimentación realizada en el banco de pruebas de cavitación hidrodinámica para diferentes presiones a la entrada del Venturi arrojaron los datos presentados en la tabla 3-1.

Tabla 2.
Datos experimentales del banco de pruebas

Caudal (m^3/s)	P1 (Pa)	P2 (Pa)	P3 (Pa)	σ
0,00034	100000	-67727,6	17236,9	0,47
0,0004	160000	-64341,2	13789,5	0,32
0,00043	200000	-66034,4	-3447,38	0,29
0,000466	260000	-64341,2	-6894,76	0,24
0,0005	300000	-70000	-6894,76	0,22

Para un número de cavitación de $\sigma = 0.22$ y $\sigma = 0.24$ se obtuvo la variación de la temperatura en un contenedor de 15 (litros) en relación al tiempo de realización del experimento como indica la tabla 3-2 y la tabla 3-3

Tabla 3.

Datos experimentales de temperatura para una intensidad $\sigma = 0.22$

Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
0	20,7
10	29,7
20	36,7
30	44,1
45	51
55	54,3
65	58,5

Tabla 4

Datos experimentales de temperatura para una intensidad $\sigma = 0.24$

Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
0	20,5
10	28,3
20	35,8
30	41,5
45	48,5
55	52,2
65	54,1

Para el cálculo del coeficiente de descarga se utiliza la expresión 1.17 derivada a partir de la ecuación 1.12.

$$C_d = \frac{Q_r}{A_2 \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \quad [1.17]$$

Por tanto, utilizando los valores identificados en la tabla 3-1, se calcula el coeficiente de descarga para el tubo Venturi que es de 0.94 como indica la tabla 3-4.

Tabla 5.

Cálculo del coeficiente de descarga para la geometría Venturi

Caudal	P1	P2	Área garganta	Área inicial	Cd
0,00034	100000	-67727,5	1,96343E-05	0,000507	0,94
0,0004	160000	-64341,2	1,96343E-05	0,000507	0,96
0,00043	200000	-66034,3	1,96343E-05	0,000507	0,95
0,000466	260000	-64341,2	1,96343E-05	0,000507	0,93
0,0005	300000	-70000	1,96343E-05	0,000507	0,94
Promedio					0,94

3.2. Dinámica de la burbuja de cavitación hidrodinámica

La ecuación de Rayleigh-Plesset se obtiene aplicando las condiciones de contorno correctas, que se derivan de las ecuaciones de Navier Stokes escritas para el flujo de líquido incompresible, radialmente simétrico, que rodea la burbuja.

Las siguientes suposiciones se han hecho en el desarrollo del modelo utilizado en el presente trabajo:

- El líquido es incompresible y la velocidad de deslizamiento entre las dos fases se descuida.
- Las burbujas tienen geometría esférica durante toda la vida.
- Se descuidan los efectos de transferencia de masa y calor a través del muro de burbujas.

- Se supone que las burbujas están en equilibrio mecánico con el entorno después de la generación.
- El flujo de cavitación en el venturi está en estado estable, es decir, el caudal másico es constante.
- Las burbujas se generan en la garganta del Venturi.

La ecuación de Rayleigh-Plesset esta definida como lo expresa la ecuación 1.6.

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_L} = R \frac{D^2 R}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{DR}{Dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{DR}{Dt} + \frac{2S}{\rho_L R}$$

Aquí, R es el radio de la burbuja de cavitación, ρ_L es la densidad del líquido, t es el tiempo, S y ν_L son la tensión superficial y la viscosidad cinemática del líquido, respectivamente. Aplicando la derivada lagrangiana $\frac{D}{Dt} = \left[\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right]$ a la ecuación de Rayleigh-Plesset y bajo el supuesto de flujo de cavitación constante, $\frac{\partial}{\partial t} = 0$. Por lo tanto, el elemento de tiempo se elimina y la ecuación se transforma como

$$\frac{p_B - p_\infty(x)}{\rho_L} = R \left(u^2 \frac{d^2 R}{dx^2} + u \frac{du}{dx} \frac{dR}{dx} \right) + \frac{3u^2}{2} \left(\frac{dR}{dx} \right)^2 + \frac{4\nu_L u}{R} \frac{dR}{dx} + \frac{2S}{\rho_L R} \quad [1.18]$$

Cuando se utiliza una ecuación de Rayleigh-Plesset presentada en la ecuación 1.18. La presión, p_B , dentro de una burbuja esférica de pequeño radio R está relacionada con la presión, p_∞ , del líquido exterior, a través de un equilibrio de esfuerzos normal a través de la superficie de la burbuja. Si se aplica la condición de no deslizamiento, es decir, $u_B \approx u_L$, donde u_L es la velocidad del líquido en la superficie de la burbuja y u_B es la velocidad del fluido dentro de la burbuja, la siguiente relación se obtiene para condiciones de equilibrio cuasi-estáticas

$$p_B - p_\infty = \frac{2S}{R}$$

Se supone que la burbuja contiene una cierta cantidad de gas contaminante con vapor de agua donde $p_B = p_G + p_v$, y p_G es la presión del gas no disuelto dentro de la burbuja. Donde se considera que p_v es la presión de vapor a una temperatura constante, entonces p_G se puede expresar usando la ley de Boyle de la ecuación 1.17 como

$$\frac{P V}{T} = cte \quad [1. 19]$$

Donde P es la presión, V el volumen y T la temperatura quedando

$$\frac{p_{Go} \left(\frac{4}{3} \pi R_0^3 \right)}{T_o} = \frac{p_G \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{T_\infty}$$

Eliminando términos y simplificando la ecuación

$$p_G = p_{Go} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3$$

Obteniendo que la presión dentro de la burbuja es

$$p_B = p_v(T_B) + p_{Go} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3$$

De acuerdo a la ecuación de Laplace que indica que la tensión superficial del líquido, es capaz de equilibrar la diferencia entre las presiones interna y externa, obtenemos

$$p_{Go} = p_\infty(0) - p_v(T_\infty) + \frac{2S}{R_0}$$

Para el cálculo de la velocidad de flujo u , se utilizó la ecuación de la recta formada por el tubo Venturi en su parte divergente.

$$y(x) = 0.176x + 0.0025$$

El área quedaría expresada como

$$A(x) = \pi(0.176x + 0.0025)^2$$

Aplicando la ecuación 1.8 de conservación de masa

$$u(x) = \frac{Q}{A(x)}$$

El campo de velocidad se indica en la figura 3-1 y quedaría expresado como.

$$u(x) = \frac{0.0005}{\pi(0.176x + 0.0025)^2}$$

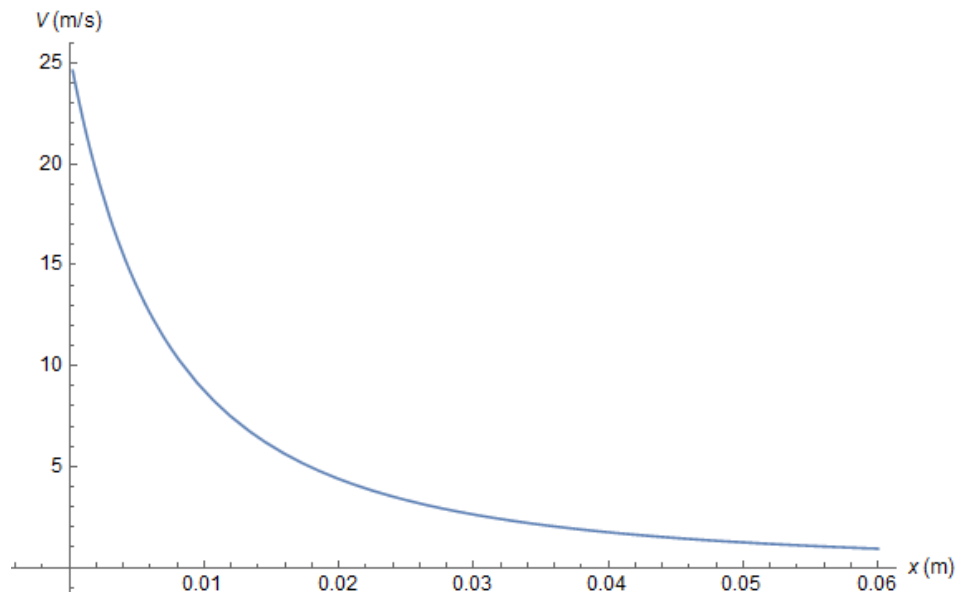


Figura 20. Velocidades promedio de flujo en la parte divergente del tubo Venturi.

El campo de presión en la parte divergente del Venturi $p_{\infty}(x)$, se calculó basado en los valores experimentalmente identificados por los manómetros en la garganta y al final del tubo Venturi.

$$p_{\infty}(x) = \begin{cases} -1.4 \cdot 10^7 x, & 0 \leq x \leq 0.05 \\ -315257 e^{-222.2x}, & x > 0.05 \end{cases}$$

En la figura 3-2 se encuentra representada la caída y recuperación de la presión desde el inicio de la cavitación, en la garganta. La distribución de la presión se la puede expresar solo de manera experimental, porque debido a la presencia de una fase adicional, el patrón de flujo cambia y no sigue el formato de la ecuación de Bernoulli.

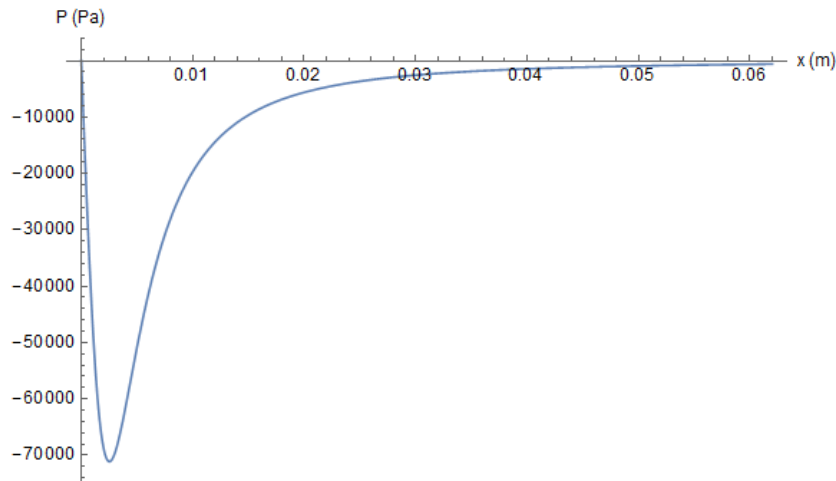


Figura 21. Campo de presión en la parte divergente del Venturi

Mediante la sustitución de las ecuaciones, añadiendo el campo de presión y la ecuación de ajuste para la velocidad de flujo u se pueden resolver simultáneamente la ecuación de Rayleigh-Plesset usando el método de cuarto orden de Runge-Kutta. Las

condiciones iniciales para la simulación son $R_0 = 10 \text{ } (\mu\text{m})$ y las propiedades físicas del líquido son: $S = 0.072 \text{ N/m}$, $\nu_L = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$.

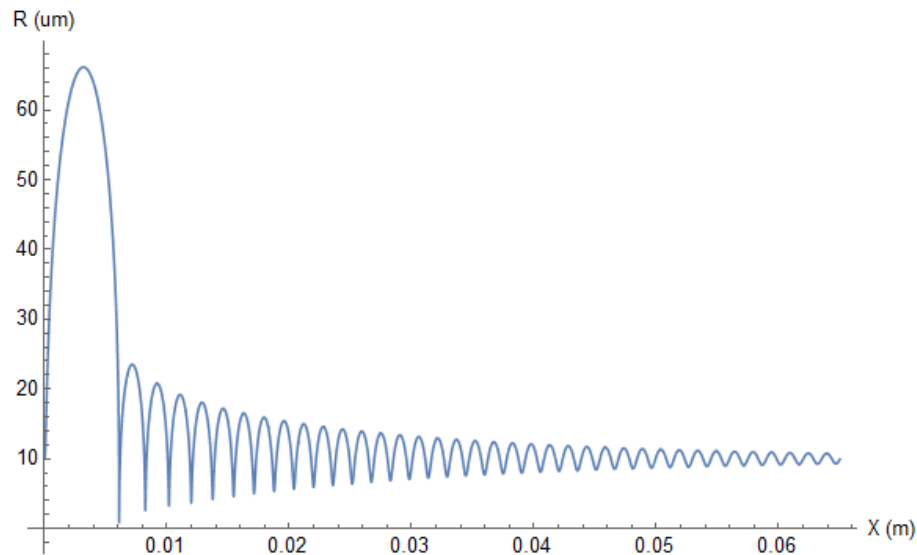


Figura 22. Crecimiento y colapso de una burbuja de cavitación

En la Figura 3-3 se muestra la gráfica del comportamiento de una burbuja desde su crecimiento, hasta su implosión.

Se puede identificar que la fase de colapso ocurre de manera muy rápida que la mayoría del vapor no tiene suficiente tiempo para condensarse en comparación con el tiempo requerido por la cinética del cambio de fase. Hasta cierto punto, este vapor restante se comporta como un gas incondensable que, por lo tanto, provocará rebotes y generará una onda de presión hacia el exterior. Además se considera la presencia de gas no condensable dentro de la burbuja, que es la parte más compresible del sistema; este se comprime continuamente y su presión aumenta drásticamente durante el colapso.

Este es el factor que causa la mayor parte de rebotes dentro de la de la burbuja. (Moss & Levatin, 2000).

En el rebote, una onda de presión se forma y se propaga hacia afuera a aproximadamente 900 m/s (Franc, 2006).

3.3. Análisis energético de cavitación hidrodinámica

El contenido de energía de una burbuja colapsada, bajo diversas condiciones de operación proporciona la información necesaria para el diseño correcto de un reactor de cavitación.

Se realiza un estudio teórico basado en el modelo de dinámica de una sola burbuja utilizando la ecuación de Rayleigh-Plesset. Los principios termodinámicos se han utilizado para calcular el trabajo realizado durante la exposición de la burbuja a cambios de presión durante la fase de colapso.

El colapso de una burbuja es un proceso adiabático sobre la base que la presión parcial de gas en la burbuja es igual a la presión de vapor de los medios cavitantes a la temperatura de funcionamiento, además el proceso se considera demasiado rápido por lo que no existe transferencia de calor y masa entre la burbuja y el entorno. (Vichare & Senthilkumar, 2000).

La energía disipada al final del colapso de la burbuja se calcula a partir del trabajo adiabático de compresión realizado por la cavidad durante su vida útil.

El volumen inicial de una burbuja (V_i) se determina como una esfera, el radio inicial es de $10 \mu m$.

$$V_i = \frac{4}{3}\pi R_i^3 = 4.189 \times 10^{-15} \text{ m}^3$$

La presión al comienzo de la fase de colapso adiabático es $2 p_v$ (Vichare & Senthilkumar, 2000). Entonces, la presión dentro de la burbuja en cualquier momento durante la fase de colapso adiabático viene determinada por

$$p_i = 2p_v \left(\frac{R_{crit}}{R_0} \right)^{3\gamma} \quad [1.20]$$

El radio crítico de la burbuja se calcula a través de la ecuación de Rayleigh-Plesset como indica la Figura 3-3.

$$R_{crit} = 64 \mu\text{m}$$

Reemplazando el $\frac{R_{crit}}{R_0} = 6.4$ y la p_v en la ecuación se obtiene la presión interna (p_i) de la burbuja

$$p_i = 7.684 \times 10^6 \text{ Pa}$$

El trabajo realizado por la burbuja durante la fase de compresión adiabática en el colapso viene dado por

$$W_{ad} = \frac{p_i V_i}{(\gamma - 1)} \left[1 - \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad [1.21]$$

Donde p_2 y p_3 son las presiones inicial y final que fueron tomadas experimentalmente en el banco de pruebas de acuerdo a la tabla 3-1. Obteniendo un trabajo de compresión adiabática de la burbuja de

$$W_{ad} = 6.654 \times 10^{-8} \text{ Joules}$$

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica en un proceso adiabático

$$\Delta U + W = 0 \quad [1.22]$$

donde U es la energía interna del sistema y W es el trabajo realizado por el sistema. Cualquier trabajo W realizado debe ser realizado a expensas de la energía U, mientras que no haya sido suministrado calor Q desde el exterior.

El cambio de la energía interna en el sistema viene determinado por

$$\Delta U = \dot{m}c_p\Delta t \quad [1.23]$$

$$\Delta U = \frac{15 [kg]}{3900 [s]} \times 4186 \left[\frac{J}{kg^\circ C} \right] \times 37.5 [^\circ C] = 603.75 [W]$$

Al multiplicar el trabajo de compresión de una burbuja por la cantidad de burbujas, obtenemos el cambio de la energía interna.

$$W_{ad} \times N = \Delta U$$

El número total de burbujas durante todo el proceso se identifica como

$$N_1 = \frac{603.75 [W] \times 3900 [s]}{6.591 \times 10^{-8} [J]} = 3.539 \times 10^{13} \text{ burbujas}$$

El número de burbujas por ciclo de cavitación, teniendo en cuenta que el período con el que ocurre el fenómeno es de 0.00303[s], viene determinado por

$$N_1 = \frac{3.539 \times 10^{13} [burbujas]}{3900 [s]} \times 0.00303[s] = 2.722 \times 10^7 \text{ burbujas}$$

El número de cavidades generadas por unidad de volumen de líquido (N_c) se determinó experimentalmente por (Vichare & Senthilkumar, 2000) en el que se obtuvo

$$N_c = 2.6445 \times 10^{13} \frac{\text{burbujas}}{\text{m}^3} .$$

Para la siguiente consideración se utilizó una captura realizada con una cámara de alta velocidad (Phantom V2512) a 110000 fps para identificar el volumen ocupado por las cavidades. A través del contraste blanco y negro, como indica la Figura 3-4, se asume que ese volumen está totalmente ocupado por burbujas de viaje de cavitación.

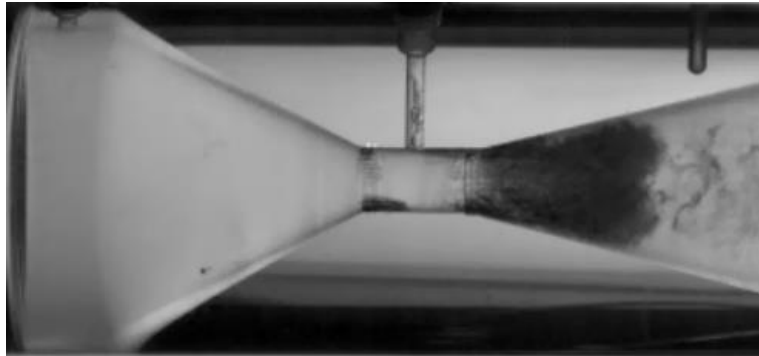


Figura 23 Volumen en contraste negro ocupado totalmente por burbujas de cavitación

Para el cálculo del volumen se realizó una relación proporcional como indica la Figura 3-5 entre las medidas del tubo Venturi y los datos de distancia identificados con el software Phantom Camara Control (PCC).

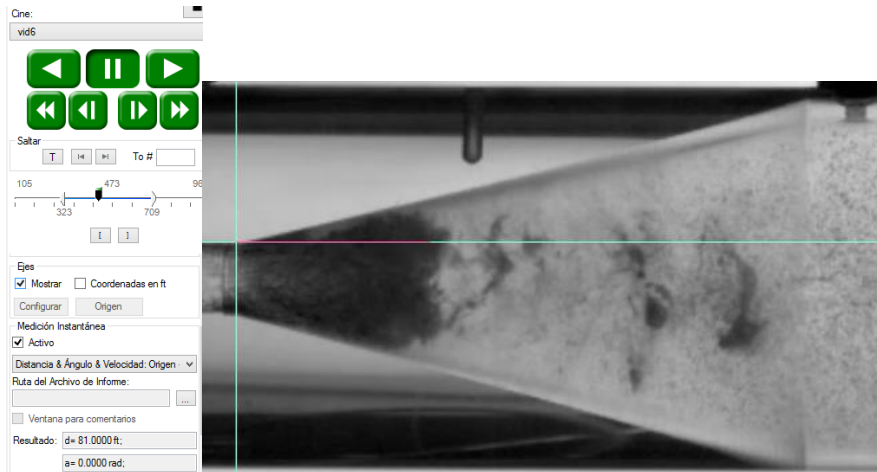


Figura 24. Relación proporcional con el software PCC para determinar el volumen

Se obtiene como resultado que el volumen ocupado por las burbujas es

$$V_{\text{contenido}} = 1096.32 \text{ [mm}^3\text{]}$$

La energía empleada en el trabajo de expansión y compresión de una burbuja, proviene del trabajo realizado por la bomba, generando un aumento de temperatura del líquido confirmando que no se crea ni se destruye energía.

El trabajo eléctrico de la bomba trifásica se calcula como

$$W_{\text{bomba}} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \quad [1.24]$$

Donde $V = 220(V)$, $I = 3.75 (A)$, y el ángulo de desfase entre líneas es $\theta = 120^\circ$.

Para obtener la potencia hidráulica de la bomba, se multiplica por la eficiencia hidráulica siendo esta del 90%.

$$P_{\text{hidráulica}} = 714.47 \text{ [W]} \cdot \eta = 643.02 \text{ [W]}$$

Las pérdidas de carga en el sistema se encuentran determinadas en la sección 2.4, de este análisis se identifica

$$P_{p\acute{e}rdidas} = \gamma \cdot Q \cdot \Delta h$$

Realizando el balance de energía donde se comprueba que la primera ley de la termodinámica.

$$P_{hidr\acute{a}ulica} - P_{p\acute{e}rdidas} = \Delta U$$

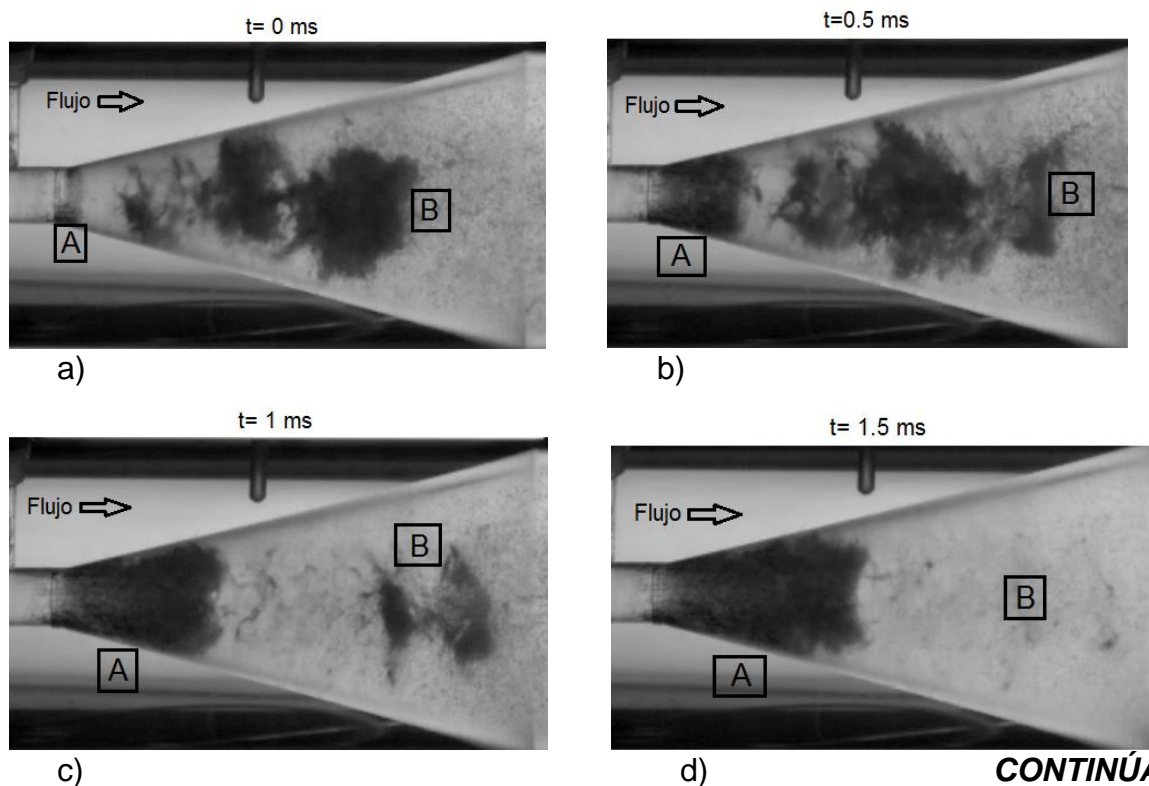
3.4. Análisis de la dinámica básica de cavitación de burbujas de viaje.

En esta sección se discuten la dinámica básica de cavitación, a partir de observaciones experimentales.

Con este fin, se presenta un evento completo desde el crecimiento hasta el colapso de las burbujas en la Figura 3-6. En 3-6a se pueden distinguir dos eventos diferentes. El primer evento se indica con una **A** y representa una cavidad incipiente. Se puede observar las burbujas en forma de anillo en la garganta del tubo Venturi, debido a la geometría del tubo y de la rugosidad presente en el zona próximas a la pared. En este sector resulta la presión más baja a causa de un aumento de la velocidad, como lo explica la ecuación de Bernoulli. El segundo evento se indica con una **B**, aquí se puede ver unas burbujas denominadas residuales, que son parte del evento anterior que se advectan con el flujo. En la figura 3-6b se puede ver que las burbujas conectadas a la garganta **A** se desarrollan, convirtiéndose en cavidades parcialmente desarrolladas, es decir han aumentado su tamaño pero no se produce ningún desprendimiento de la pared del tubo Venturi, mientras tanto en el sector **B** se puede observar una advección adicional con el flujo de las burbujas separadas. En la figura 3-6c, las burbujas siguen creciendo

denotadas con **A**, convirtiéndose en cavidades totalmente desarrolladas, es decir, están a punto de desprenderse de la garganta. Otra observación es el colapso parcial de las burbujas en el sector **B**. En la figura 3-6d, las burbujas en **A** comienzan la separación de la garganta y en **B** se observa como todas las burbujas han desaparecido por un colapso total, seguido por una onda de choque. En la figura 3-6e se observa el fenómeno denominado jet entrante de pared y las burbujas del sector **A** se separan de la garganta y advectan al flujo. En la figura 3-6f una nueva cantidad de burbujas comienzan a desarrollarse denotadas por **C** en la garganta Venturi, y se repite el ciclo.

Un ciclo de cavidad se puede resumir por lo siguiente: inicio de la cavitación, desarrollo de las cavidades, desprendimiento con advección y un colapso total aguas abajo.



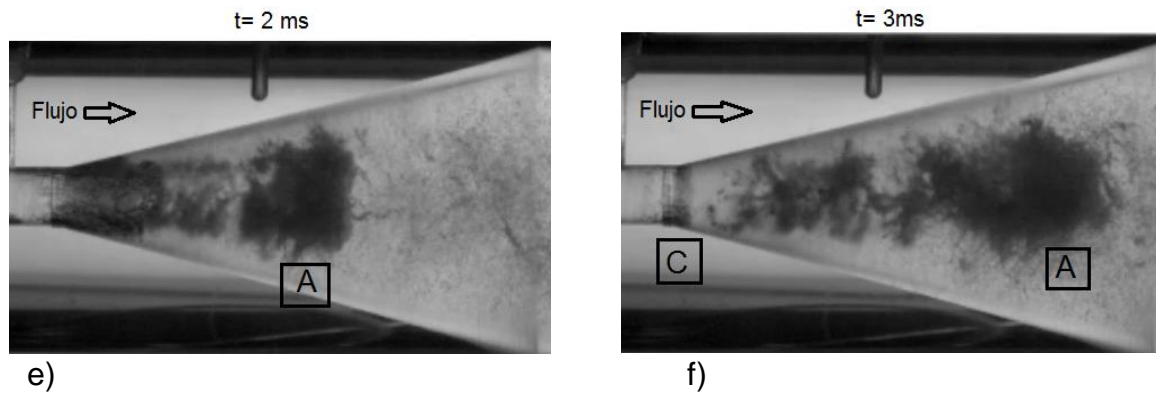


Figura 25. Diferentes marcos de video de un evento completo de crecimiento de las cavidades en el Venturi

3.5. Distancia recorrida por las burbujas de cavitación de viaje

La intensidad de la cavitación, se puede describir con el número de cavitación como se define en la ecuación 1.4. La cavitación más intensa está representada por un número bajo de cavitación como se indica en la tabla 3-1. Para un número de cavitación decreciente, la longitud de las cavidades en el momento del desprendimiento es más larga (Hogendoorn, 2017). Esto se visualiza esquemáticamente para cinco distancias recorridas por las burbujas en la Figura 3-7. Se puede observar que mientras disminuye el número de cavitación, las cavidades crecen más tiempo antes del desprendimiento y advección al flujo. Otra observación importante es que la longitud donde implotan todas las burbujas es mayor conforme disminuye el número de cavitación como se presenta en la Figura 3-8. Esta figura es una aproximación del comportamiento de las cavidades para distintas intensidades, determinando que la longitud de las cavidades, antes de la implosión, es una función exponencial del número de cavitación

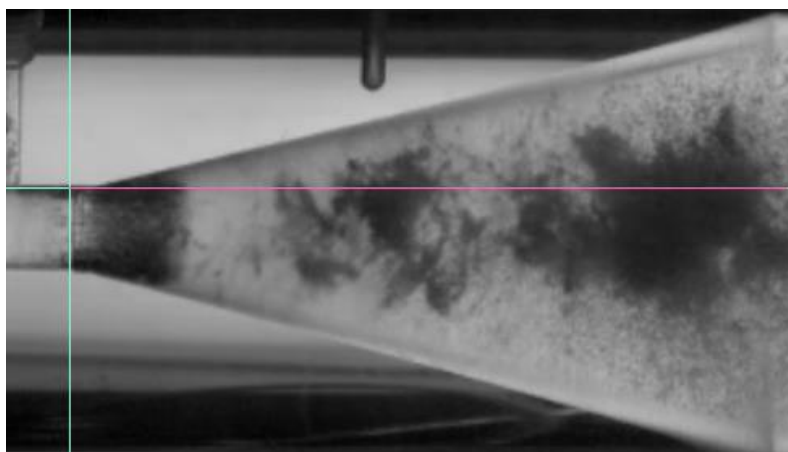


Figura 26. Medición de la distancia recorrida por las burbujas antes de la implosión

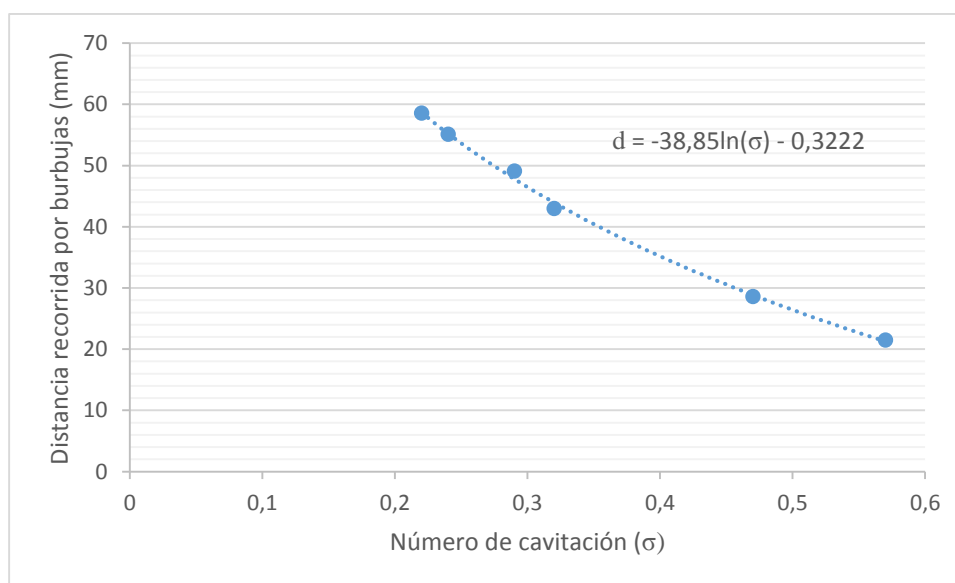


Figura 27. Comportamiento no lineal de la distancia de implosión de las cavidades

3.6. Mecanismo de desprendimiento de las cavidades

El mecanismo de desprendimiento de las cavidades es básicamente una desconexión de las cavidades crecientes y la garganta, causada por la condensación.

Para esta condensación existen 2 mecanismos principales: el primer método es el jet entrante que es impulsado por presión, mientras que el segundo es el choque burbujeante que es impulsado por ondas de choque.

Desde las imágenes de alta velocidad, se puede identificar de manera muy clara los mecanismos que causa el desprendimiento de las cavidades. El primer mecanismo denominado jet entrante se obtiene debido a la forma del Venturi, en donde la separación del flujo es forzada, en combinación con un gradiente de presión adverso (la presión aguas abajo es relativamente alta y la presión en la garganta es mucho menor), da lugar al desarrollo de un jet entrante, hasta lograr despegar las cavidades de la pared del Venturi, como se observa en la Figura 3-9.

La formación del jet entrante ocurre posterior al colapso de cavidades previamente separadas y advectadas al flujo. Este colapso causa una onda de presión, que se emite en varias direcciones, que provoca la condensación parcial de las cavidades, dando lugar al segundo mecanismo denominado choque burbujeante.

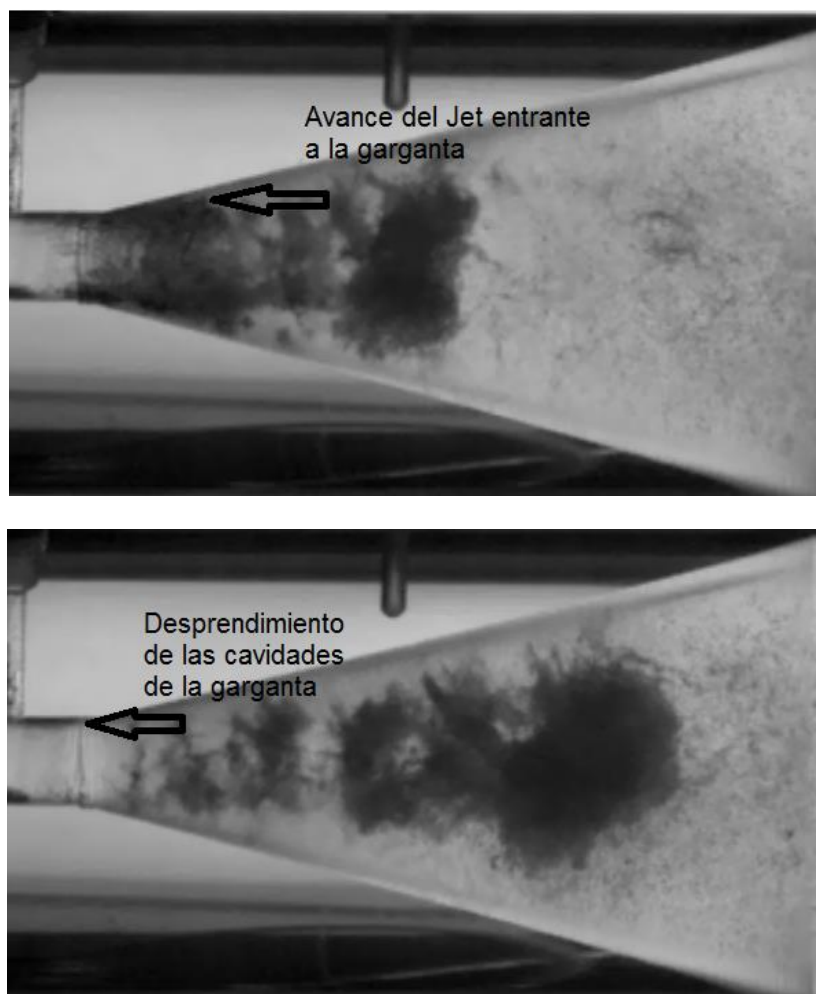


Figura 28. Mecanismo del jet entrante para el desprendimiento de las cavidades.

3.7. Resultados de la experimentación bactericida

Se puede realizar las siguientes observaciones.

- 1) Luego de tratar el agua durante el mismo tiempo a distintas presiones de descarga se evidencia que cuando la presión de descarga aumenta, el grado de eficiencia de desinfección también aumenta.

- 2) Al aumentar la presión de descarga, la caída de presión es mayor, lo que provoca una mayor duración en cada evento de cavitación (0.00267 segundos para 2 bar y 0.00303 segundos para 3 bar) logrando que las cavidades crezcan más. Las mismas que posteriormente generarán un mayor trabajo de compresión y producirán un colapso más violento presentando presiones aproximadas a 18 MPa (Franc, 2006).
- 3) Al realizar el recuento del resultado final en el tratamiento con 2 bar de presión se presentó una gran cantidad de UFC de dimensiones muy diminutas pero perceptibles a simple vista, lo cual imposibilitó el conteo y mostró un comportamiento fuera de la tendencia.

3.8. Eficiencia energética

Con la finalidad de verificar la viabilidad económica del proceso de cavitación, se calcula la tasa de consumo de energía para un grado específico de desinfección. Este método se basa únicamente en el consumo de energía eléctrica, realizando los siguientes cálculos:

Tiempo del tratamiento:	65 minutos (3900 s)
Volumen utilizado:	15000 [ml]
Consumo eléctrico:	714 [W]
UFC/ml inicial:	19600
Al cabo de 65 min, UFC/ml:	100
UFC eliminadas en 65 min	19500

UFC eliminadas/W de consumo eléctrico:

$$\frac{19500 \text{ UFC/ml}}{648 \text{ W}} = 30.1 \frac{\text{UFC/ml}}{\text{W}}$$

UFC eliminadas/J de consumo eléctrico:

$$30.1 \frac{\text{UFC} * \text{s}}{\text{ml} * \text{J}} * \frac{15000 \text{ ml}}{3900 \text{ s}} = 115.77 \frac{\text{UFC}}{\text{J}}$$

Adicionalmente se calcula el costo en base a la energía eléctrica que se consumió al aplicar el tratamiento a 15 litros de agua durante los 65 minutos.

$$\frac{0.714}{15} \left[\frac{\text{kW}}{\text{lbs}} \right] * \frac{65}{60} [\text{h}] = 0.051 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{lbs}} \right]$$

$$0.051 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{lbs}} \right] * 0.091 \left[\frac{\$}{\text{kWh}} \right] * 1000 \left[\frac{\text{lbs}}{\text{m}^3} \right] = 4.69 \left[\frac{\$}{\text{m}^3} \right]$$

4. CAPÍTULO

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1. Conclusiones

- Se logró obtener el efecto de cavitación hidrodinámica, utilizando como dispositivo de caída de presión un tubo Venturi, en el que se consiguió visualizar la dinámica de las burbujas de cavitación a través de una cámara de alta velocidad.
- Se describe el movimiento de una burbuja de viaje de cavitación mediante la ecuación de Rayleigh-Plesset. Al resolver numéricamente esta ecuación, se identifica el comportamiento de crecimiento, rebote y colapso de la burbuja.
- Debido al fenómeno de aumento de temperatura, se llevó a cabo un balance de energía para la presión de descarga de 3 bar. Este balance se realizó tomando en cuenta la disipación de energía calorimétrica realizada por cada burbuja al efectuar un trabajo de compresión adiabático durante su vida útil.
- Mediante la cámara de alta velocidad se identificó un ciclo total de formación de burbujas de cavitación determinado por inicio de la cavitación, desarrollo de las cavidades, desprendimiento con advección y un colapso total aguas abajo. Así como, el desprendimiento periódico de las cavidades en la región de la garganta que se produce debido a dos mecanismos diferentes, denominados como jet entrante y choque burbujeante. Para $\sigma > 0.32$ ambos mecanismos tienen validez en el desprendimiento de las cavidades, mientras que cuando se intensifica el fenómeno $\sigma < 0.32$, el mecanismo que prevalece es el jet entrante impulsado por un gradiente de presión adverso.

- Para diferentes intensidades de cavitación, se encuentra que la longitud de la cavidad y el tiempo son función del número de cavitación y que a menor número de cavitación el fenómeno se intensifica. En el caso de la longitud recorrida por las cavidades en función del tiempo, se determinó que la distancia recorrida por las cavidades, antes de la implosión, aumenta exponencialmente conforme disminuye el número de cavitación.
- Se comprobó la aplicabilidad del fenómeno de cavitación hidrodinámica como un proceso bactericida, al tomar muestras del río Santa Clara y someterlas al tratamiento durante 65 minutos a distintas presiones.
- Se evidenció que un aumento en la presión de descarga produce una mayor caída de presión, en la vena contracta, la cual permite un mayor crecimiento en el volumen de cada burbuja. También provoca un aumento en la duración de cada evento, antes de que las cavidades se desprendan de la garganta, permitiendo así, que la cantidad de burbujas formadas por ciclo aumente.

4.2. Recomendaciones

- Como el agua de los ríos en el país se encuentran en su mayor parte contaminada por desechos industriales, orgánicos y tóxicos, es importante tomar precauciones como gel y alcohol antiséptico al momento de recoger el agua para evitar infecciones en la piel.
- El banco de pruebas antes de cada ensayo adicional de cavitación con aguas contaminadas, debe ser desinfectado utilizando antisépticos que eliminen

cualquier colonia adicional de bacterias, garantizando los datos de la experimentación.

4.3. Trabajos futuros

- Estudiar el fenómeno de cavitación hidrodinámica como un método de intensificación en la desinfección de agua, añadiendo cloro en cantidades controladas pero inferiores a lo que se haría por un tratamiento que incluya solamente cloración. Posteriormente someter el agua al tratamiento y contabilizar las unidades formadoras de colonias después de un tiempo determinado. Con este estudio se busca probar si la cavitación logra debilitar las paredes celulares más fuertes de las bacterias Gram positivas, y permitir que el cloro ataque directamente al interior de estas, aumentando la eficiencia del proceso.
- Ensayar distintos diseños para el dispositivo de caída de presión, probando entre tubos Venturi y placas orificio, con diferentes geometrías, a una misma presión de descarga; con el fin de determinar si esto es una variable sobre la eficiencia del tratamiento de desinfección mediante cavitación hidrodinámica.
- El fenómeno de cavitación conduce a la formación de especies altamente reactivas que en el caso del agua produce radicales hidroxilos (OH) los cuales pueden reaccionar con otros compuestos. Por lo tanto, es necesario analizar las reacciones químicas que se puedan desarrollar en el agua dependiendo de los elementos que se puedan encontrar en esta.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, J. (2015). *Instrumentación de un circuito hidrodinámico para la observación de la cavitación*. México DF.
- Ashbolt, N. J. (2004). Risk analysis of drinking water microbial contamination versus disinfection by-products (DBPs). *Toxicology* 198, 255-262.
- Benito, Y., & Arrojo, S. (2005). Hydrodynamic Cavitation as a low-cost AOP for wastewater treatment. *Water Resources Management* III, 495-503.
- Brennen, C. (1995). *Cavitation and Bubble Dynamics*. New York: Oxford University Press.
- Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Estados Unidos de América: Butterworth-Heinemann.
- Davies. (1972). Turbulence Phenomena at Free Surfaces . *AIChE Journal*, 169-173.
- Edzwald, J. K. (2011). *Water Quality & Treatment A Handbook on Drinking Water*. McGraw-Hill.
- Eisenberg , P. (1964). Cavitation. *MIT Macrofluid Laboratory*, 121-128.
- Fox, R., & McDonald, A. (1995). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. México DF: McGRAW-HILL.
- Franc, J. P. (2006). *Physics and Control of Cavitation*. France: University of Grenoble.
- Franc, J. P. (2006). *The Rayleigh-Plesset equation: a simple and powerful tool to understand various aspects of cavitation*. Francia: University of Grenoble.
- Frenkel, Y. I. (1955). *Kinetic theory of liquids*. New York.
- Gogate, P. (2001). *Hydrodynamic Cavitation Reactors: A state of the art review*. Mumbai: University of Mumbai, Matunga.
- Gogate, P. (2007). Application of cavitation reactors for water disinfection. *Journal of Environmental Management*, 801-815.
- Gogate, P., & Pandit, A. (2001). Hydrodynamic cavitation reactors: A state of the art review. *Reviews in Chemical Engineering*, 1-85.
- Hogendoorn, W. (2017). *Experimental investigation of cavitation regimes in a converging-diverging nozzle*. Países Bajos: Delft University of Technology.
- Jyoti, K., & Pandit, A. (2001). Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering*.
- Karamah, E., & Sunarko, I. (2013). Disinfection of bacteria Escherichia Coli using hydrodynamic cavitation. *International Journal of Technology*, 209-216.
- Knapp, R. (1955). Recent Investigations of the Mechanics of Cavitation and Cavitation Damage. *Transactions of ASME*, 1045-1054.
- Lowy, F. (17 de Agosto de 2009). *Columbia University*. Obtenido de <http://www.columbia.edu/itc/hs/medical/pathophys/id/2009/introNotes.pdf>

- Majumdar, A. (2002). Numerical modeling of cavitating venturi – a flow control element of propulsion system. *Thermal & Fluids Analysis Workshop* (pág. 27). Houston: NASA/Marshall Space Flight Center.
- Marchegiani, A. R. (2006). *Cavitación*. Comahue: Laboratorio de Máquinas Hidráulicas.
- Matevž , D., Tjaša , G.-B., & Gutierrez, I. (2015). Use of hydrodynamic cavitation en waste water treatment. *Ultrasonics*.
- Medina, L., & Valencia, L. (2008). *Evaluación de la eficacia de un desinfectante de alto nivel, a base de peróxido de hidrógeno, empleado en la esterilización de dispositivos e instrumentos hospitalarios*. Bogota.
- Mezule, L. S., & Tsyfansky, V. (2009). A Simple Technique for Water Disinfection with Hydrodynamic Cavitation: Effect on Survival of Escherichia coli. *Desalination*, 152-159.
- Molla, F., & Manuele, D. (2011). Caracterización del tipo de cavitación mediante dinámica computacional de fluidos para posteriores aplicaciones al estudio experimental del daño por cavitación. *Mecánica Computacional Vol XXX*, 435-450.
- Moss, W., & Levatin, J. (2000). A new damping mechanism in strongly collapsing bubbles. *The Royal Society*, 2983-2994.
- Neutrium. (11 de 02 de 2015). *Discharge coefficient for nozzles and orifices*. Obtenido de https://neutrium.net/fluid_flow/discharge-coefficient-for-nozzles-and-orifices/
- Niedźwiedzka, A., & Sobieski, W. (2016). Analytical Analysis of cavitating flow in venturi tube on the basis of experimental data. *Technical Sciences*, 215-229.
- NTE INEN 1108. (01 de 2014). *Agua potable. Requisitos*. Quito, Ecuador.
- Núñez , A., & Valdiviezo, F. (2014). *Implementación de un banco de pruebas para la medición de caudal en flujo cerrado* . Riobamba : Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Oram, B. (2014). *Water Research Center*. Obtenido de Ozonation in Water Treatment: <https://www.water-research.net/index.php/ozonation>
- Pandit, A. B., & Kumar, J. K. (2013). *Drinking Water Disinfection Techniques*. Boca Raton: CRC Press.
- Plesset , M. (1969). *Tensile Strength of Liquids*. Pasadena, California.
- Plesset, M., & Prosperetti, A. (1977). *Annual Review of Fluid Mechanics*. Palo Alto: Annual Reviews.
- Prescott, L., Harley, J., & Klein, D. (2002). *Microbiología*. España: McGraw-Hill.
- Reader-Harris. (2001). Discharge coefficients of Venturi tubes with standard and non-standard convergent angles. *Flow Measurement and Instrumentation*, 135-145.
- Rudolf, P. (2014). Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle. *EDP Sciences*, 2-6.

- Rudolf, P., Hudec, M., Gríger, M., & Štefan, D. (2014). Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations. *EDP Sciences*, 1-6.
- Ruiz, M. (8 de Julio de 2013). *Wikipedia*. Obtenido de Bacteria: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bacterial_morphology_diagram-es.svg
- Salamanca, U. d. (2003). *Microbiología de los Ecosistemas Acuáticos*. Obtenido de http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/microbiologia/unidades/documen/uni_02/57/caphtm/cap0403.htm
- Siegel, A. (28 de Octubre de 2011). *Quora*. Obtenido de <https://www.quora.com/What-are-the-various-shapes-of-bacteria>
- Smith, A., & Corripio, A. (2006). *Principles and practice of automatic process control*. Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Stanley, C., Barber, T., & Rosengarten, G. (2014). Re-entrant jet mechanism for periodic cavitation shedding in a cylindrical orifice. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 169-176.
- Tapia, E. (24 de Octubre de 2017). La tarifa de energía eléctrica para industrias se revisa . *El Comercio*.
- Tortora, G., Funke, B., & Case, C. (2007). *Introducción a la Microbiología*. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana.
- Vichare, N., & Senthilkumar, P. (2000). Energy Analysis in Acoustic Cavitation. *Industrial & Engineering Chemistry* , 1480-1486.
- von Sonntag, C. (1986). Disinfection by free-radicals and UV-radiation. *Water Supply*, 4:9-10.
- Williams, P., & Williams, R. (2002). Cavitation of liquids under dynamic. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2222-2230.