

**APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE
FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)
AL ESTUDIO DE GEOMETRÍAS TIPO
VENTURI PARA LA PRODUCCIÓN
DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA**

APPLICATION OF
COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS (CFD) TO THE STUDY
OF VENTURI-TYPE GEOMETRIES
FOR HYDRODYNAMIC CAVITATION
PRODUCTION

APLICAÇÃO DA DINÂMICA
DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAIS (CFD)
AO ESTUDO DAS
GEOMETRIAS VENTURI-
TIPO PARA PRODUÇÃO
DECAVITAÇÃO
HIDRODINÂMICA

Sergio Torres

Facultad de Ciencias e Ingeniería,
Grupo de Investigación GIMAC,
Universidad de Boyacá,
sdtorres@uniboyaca.edu.co

Diego Figueredo

Facultad de Ciencias e Ingeniería,
Grupo de Investigación GIMAC,
Universidad de Boyacá,
dfiguero@uniboyaca.edu.co

Carlos Ramírez

Facultad de Ciencias e Ingeniería,
Grupo de Investigación GIMAC,
Universidad de Boyacá,
cramirez@uniboyaca.edu.co

Fecha de Recepción: 29 de noviembre de 2019
Fecha aprobación: 12 de marzo de 2020

Resumen

La cavitación, es un efecto hidrodinámico, representado en la liberación de altas cantidades de energía, producto de la despresurización abrupta de una masa fluida y causante de fenómenos sumamente interesantes y beneficiosos en diversos campos de la ingeniería, debido a las múltiples propiedades tanto físicas como químicas que presenta. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, en esta investigación se estudiaron los efectos que podrían tener los distintos parámetros geométricos (diámetros, ángulos y longitudes) y físicos (presión, velocidad y número de cavitación) sobre la consecución de la cavitación. Esto se llevó a cabo mediante la simulación de doce diferentes geometrías (realizadas en AutoCAD) en el software comercial ANSYS Fluent 19.0. Finalmente, se obtuvo como resultado la existencia de una alta actividad cavitacional cuando es utilizada una geometría tipo III (longitud de 1 mm y ángulo divergente de 7.5°) sometida a una presión inicial de 10 atmósferas.

Palabras clave— Cavitación, Dinámica de Fluidos Computacional, Depuración de aguas.

Abstract

Cavitation is a hydrodynamic effect, represented in the release of high amounts of energy, the product of the abrupt depressurization of a fluid mass and causing highly interesting and beneficial phenomena

in various fields of engineering, due to the multiple physical and chemical properties it presents. Taking into account the above, this research studied the effects that the different geometric (diameters, angles and lengths) and physical (pressure, speed and number of cavitation) parameters could have on the attainment of cavitation. This was done by simulating twelve different geometries (performed in AutoCAD) in the commercial software ANSYS Fluent 19.0. Finally, high cavitation activity was obtained when a type III geometry (length of 1 mm and divergent angle of 7.5°) is used under an initial pressure of 10 atmospheres.

Keywords— Cavitation, Computational Fluid Dynamics, Water Purification.

Resumo

A cavitação é um efeito hidrodinâmico, representado na liberação de altas quantidades de energia, produto da abrupta despressurização de uma massa fluida e causando fenômenos extremamente interessantes e benéficos em diversos campos da engenharia, devido às múltiplas propriedades físicas e químicas que apresenta. Levando-se em conta o acima, esta pesquisa estudou os efeitos que os diferentes parâmetros geométricos (diâmetros, ângulos e comprimentos) e físicos (pressão, velocidade e número de cavitação) poderiam ter sobre a realização da cavitação. Isso foi feito simulando doze geometrias diferentes (realizadas no AutoCAD) no software comercial ANSYS Fluent 19.0. Finalmente, a alta atividade

cavitacional foi obtida quando uma geometria tipo III (comprimento de 1 mm e ângulo divergente de 7,5o) é usada sob uma pressão inicial de 10 atmosferas.

Palavras-chave— Cavitation, Computational Fluid Dynamics, Water Purification.

Introducción

Actualmente en el mundo existe una gran problemática en torno a la contaminación de las fuentes de aguas superficiales producto de los vertimientos de materia orgánica, sólidos suspendidos, diversos metales, químicos utilizados en los cultivos, entre otros. (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, 2015)). Debido a esto la calidad de agua en los cuerpos hídricos superficiales se ha deteriorado, causando que poblaciones que utilizan el recurso se vean afectadas.

En el caso del departamento de Boyacá, existe un creciente problema en torno a la calidad del recurso hídrico, causado por los vertimientos de origen doméstico o industrial sobre los cuerpos superficiales, generando una variación en sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas.

En vista de esta situación, se han generado diversas alternativas en el ámbito de la depuración de las aguas, que van desde los tratamientos convencionales (biológicos y químicos), hasta tratamientos más modernos como técnicas de remoción de contaminantes emergentes.

En marco de la presente investigación, se estudiará un tratamiento de depuración, basado en el tratamiento de las aguas residuales vía plasma, la cual según la literatura presenta altas eficiencias en torno a la remoción de microorganismos patógenos, con el fin de ser utilizada como post tratamiento de los sistemas de tratamiento de aguas convencionales.

Este sistema de tratamiento, funciona siguiendo tres fases consecutivas: la primera fase (Desarrollada en la presente investigación) es el "Diseño de la cámara de evaporación", seguida por la cámara de reacción (o contacto con plasma) y culminada con la cámara de condensación, para finalmente realizar un acople de los tres modelos y así llevar a cabo el tratamiento completo.

Como se mencionó previamente, el presente trabajo de investigación se enmarca dentro de una de las fases previas al estudio de un dispositivo depurador de aguas, vía plasma; por tal motivo se propone investigar el proceso de conversión de una monofase líquida en una bifase líquido gas, teniendo en cuenta los principios hidrodinámicos de la cavitación, con el fin de maximizar la eficiencia del contacto entre el líquido y las partículas de plasma. Durante el estudio se tuvieron en cuenta principalmente los parámetros geométricos y operacionales de la cámara, además del mecanismo físico a través del cual se producirá la cavitación. Como resultado de la investigación, se simuló el fenómeno de cavitación en el software FLUENT 19.0.

Como se mencionó anteriormente, esta investigación sirve como base para la implementación de un reactor depurador de aguas residuales a base de plasma, el cual permita proponer una solución para mitigar el impacto causado por los vertimientos en los cuerpos de agua superficial.

Marco teórico

A. Cavitación

La cavitación es un fenómeno hidrodinámico, el cual ha sido descrito de diferentes maneras por diversos autores a lo largo de varias décadas de estudio, en donde cada uno ha complementado la definición original mediante sus investigaciones, sin embargo, el principio y la consecuencia física sigue siendo la misma; de esta manera se establece como una definición general de cavitación: "El fenómeno hidrodinámico que se presenta cuando las regiones de los fluidos experimentan una caída de presión, hasta el punto de alcanzar la presión de vapor local, (Brennen, C, 2005), provocando la formación de cavidades de vapor (burbujas) al interior del líquido (Charrière, Goncalvès 2015 & Kuldeep, Saharan 2016), las cuales a su vez experimentan tres fases consecutivas: formación (1), crecimiento (2) y colapso adiabático (3) (Bashir, T y otros 2011 & Yi, C y otros 2018).

De igual forma este fenómeno puede ser entendido como una rápida transición o cambio entre fases líquido-gas (Gagol, M y otros 2018), no solo dependiendo del cambio de temperatura, sino priorizando la despresurización del fluido.

B. ¿Cómo se produce la cavitación?

La cavitación hidrodinámica se produce fundamentalmente al llevar a cabo una caída de presión en un muy corto intervalo, provocando una alteración del equilibrio hidrodinámico, compensado en la generación de cavidades con condiciones supercríticas. Desde este punto de vista y con base en la literatura explorada alrededor de esta temática, existen dos formas principales de lograr esta despresurización. La primera es mediante la reducción de diámetros en un tubo Venturi y la segunda es mediante el flujo a través de orificios (Carpenter, J y otros 2016).

1) Cavitación mediante contracciones tipo Venturi

El tubo Venturi es un dispositivo comúnmente utilizado en el ámbito de la ingeniería, debido a las múltiples aplicaciones que posee en este campo (transporte y mezcla de fluidos, extracción de líquidos, diseños aerodinámicos, entre otros.) (Tukimin, A. y otros 2016). Este tipo de consecución de cavitación, se caracteriza principalmente por el paso de un fluido a través de una suave sección convergente y una posterior divergente, en donde se logra principalmente una caída de presión, producto de la disminución del diámetro en el accesorio y seguido de un aumento de la velocidad, logrando así, un equilibrio en la conservación de la energía.

2) Cavitación mediante el flujo a través de orificios

Este mecanismo de consecución de cavitación es obtenido cuando ocurre un flujo de un líquido a través de unas placas compuestas por agujeros, causando una depresión en el fluido, la cual, si cae por debajo de la presión vapor, va a producir un fenómeno local de cavitación (Simpson, A., & Ranade, V., 2018). El flujo a través de orificios tiene algunas ventajas entre las que se encuentran: un diseño simple que permite una mejora económica y altas eficiencias en la disipación de la energía (He, N., & Zhao, Z. 2010), Además se ha demostrado en diferentes investigaciones su eficiencia en torno a la consecución de la cavitación (Ai, W., & Ding, T. 2010) (Nurick, W., 1976) (Saharan, V. y otros, 2013).

C. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La CFD (Computational Fluid Dynamics), es una herramienta informática, cuyo objetivo es principalmente dar una solución aproximada a todos aquellos fenómenos complejos (Ferziger, J., & Peric, M., 2002), mediante la discretización de las ecuaciones de derivadas parciales, transformándolas en ecuaciones algebraicas, las cuales pueden ser resueltas en un ordenador.

En el presente estudio se utilizó esta herramienta (FLUENT 19.0) para simular el comportamiento de la cavitación al interior de un dispositivo tipo Venturi.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló principalmente en varias fases consecutivas, con el fin de garantizar un éxito en el estudio. La primera fase que se realizó fue una recopilación del estado del arte, seguido de esto se eligió y se diseñó la geometría del accesorio para finalmente llevar a cabo las simulaciones en el software FLUENT 19.0. A continuación se explican de forma más detallada cada una de las fases.

A. Recopilación del estado del arte.

Dentro de la primera fase se realizó una constante búsqueda exhaustiva de información caracterizada por presentar estudios detallados sobre la teoría de cavitación, aplicaciones de la cavitación, simulación de este fenómeno hidrodinámico en distintos programas computacionales junto con sus respectivas validaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, se buscó información de tipo secundaria, representada fundamentalmente en investigaciones científicas (Artículos en inglés y español) y libros digitales. Sin embargo, cabe aclarar que esta fase no solo fue desarrollada al inicio, sino que a lo largo del estudio se desarrolló una constante revisión de la literatura asociada a la investigación.

B. Elección de las geometrías a simular.

Con base en la literatura revisada se estableció que lo fundamental para llevar a cabo un fenómeno de cavitación hidrodinámica por medio de tubos Venturi, son las dimensiones y la geometría del

accesorio o reactor. Por lo tanto, de acuerdo a algunos autores como (Bashir, T. y otros 2011 & Jain, T., y otros 2014), se optó por modelar un dispositivo de tipo vena contracta con una garganta circular, debido a las altas eficiencias que presentaba en torno a la producción y estabilidad de la fracción de vapor, caracterizada además por un diseño cómodo y sencillo.

Seguido de esto, se decidió realizar una optimización del tubo cavitante mediante la variación de algunos parámetros tales como: la longitud de la boquilla, el ángulo de divergencia y el diámetro convergente, esto con el fin de realizar las posteriores simulaciones en FLUENT 19.0, y así identificar cual es la geometría más eficiente en torno a la consecución de la cavitación.

C. Diseños de las geometrías en AutoCAD.

Considerando lo planteado anteriormente y teniendo en cuenta los parámetros geométricos establecidos, se procedió a realizar los diseños en la herramienta AutoCAD, con el objetivo principal de exportarlos en un formato IGES al software FLUENT 19.0 para su posterior simulación.

D. Simulación de la cavitación en FLUENT 19.0.

Luego de haber creado y exportado las geometrías en formato IGES, se procedió a importar los diseños y establecer las condiciones físicas que se modelarán. Teniendo en cuenta lo anterior, y lo planteado a lo largo del presente documento, se realizó la simulación con las siguientes características:

- Modelo de cavitación propuesto por Schnerr & Sauer
- Modelo de dinámica de burbujas de Rayleigh-Plesset.
- Modelo de turbulencia (k-ε).
- Modelo multifásico (Agua/vapor de agua)

Métodos de solución:

Tabla 1. Métodos de solución de FLUENT 19.0.

Variable	Método de discretización
Acoplamiento de presión velocidad.	Coupled
Gradiente	Least squares cell based
Presión	¡PRESTO!
Momento	First Order Upwind
Fracción de volumen	First Order Upwind
Energía cinética de turbulencia	Second Order Upwind
Tasa de disipación de turbulencia	Second Order Upwind

Fuente: Autor

Considerando las anteriores condiciones se procedió a simular el fenómeno de cavitación en las geometrías previamente diseñadas, con distintos valores de presión inicial (3, 5, 7, 10 y 13 atmósferas), con el objetivo de simular el comportamiento de cada geometría sometida a distintos valores de presión inicial.

E. Análisis y comparación de los resultados simulados.

Posterior a la simulación de las geometrías diseñadas, se procedió a realizar el análisis y la comparación de los resultados, enfatizando principalmente en tres

parámetros la fracción de volumen de vapor, la velocidad y la densidad del fluido (que permite observar la estabilidad del fenómeno). Con base en los resultados obtenidos, se tomó finalmente la decisión en cuanto a la geometría y la presión óptima con la cual el fenómeno de cavitación se podría generar de manera estable.

Resultados

Considerando lo mencionado previamente en el presente estudio se llevó a cabo el diseño de doce diferentes geometrías, en donde se evaluaron algunas condiciones geométricas, especialmente en la zona de la constricción o garganta (donde se estableció un diámetro de la boquilla de 3 mm y se varió la longitud de la misma en

valores de 0 mm, 1 mm, 3 mm y 6 mm) y en la zona divergente (donde se varió el ángulo de divergencia en valores de 5. 5°, 6. 5° y 7. 5°). Con base en estos parámetros y asegurando algunos valores constantes como el diámetro de entrada y el diámetro de la constricción, se generaron las siguientes geometrías (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros geométricos de las diferentes geometrías.

Tipo de geometría (mm)	Diámetro de entrada (mm)	Ángulo convergente (°)	Longitud de la boquilla (mm)	Diámetro de la boquilla (mm)	Ángulo divergente (°)	Diámetro de salida (mm)
I	50.8	30.85	1	3	5.5	5.88
II	50.8	30.85	1	3	6.5	6.42
III	50.8	30.85	1	3	7.5	6.96
IV	50.8	30.85	3	3	5.5	5.88
V	50.8	30.85	3	3	6.5	6.42
VI	50.8	30.85	3	3	7.5	6.96
VII	50.8	30.85	6	3	5.5	5.88
VIII	50.8	30.85	6	3	6.5	6.42
IX	50.8	30.85	6	3	7.5	6.96
X	50.8	30.85	0	3	5.5	5.88
XI	50.8	30.85	0	3	6.5	6.42
XII	50.8	30.85	0	3	7.5	6.96

Fuente: Autor

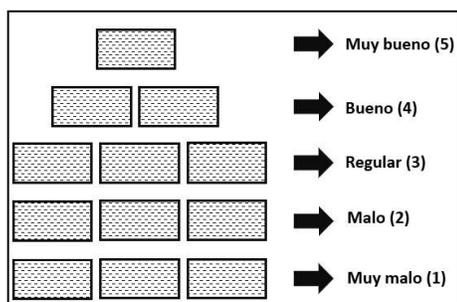
Posteriormente, y como resultado de las simulaciones en FLUENT 19.0, se obtuvo el comportamiento de distintas variables tales

como: presión (estática, dinámica y absoluta), velocidad (x, y, z y magnitud escalar), fracción de las fases (agua, vapor),

densidad (agua, vapor, multifase), turbulencia (energía, tasa de disipación, intensidad), entre otros. FLUENT genera los resultados en dos formatos diferentes, el primero se presenta en forma de contornos, en donde se identifica tridimensionalmente, y a través de una escala cromática los valores de las distintas variables en la geometría, mientras que el segundo es por medio de gráficas, en donde se puede obtener una curva sobre el comportamiento de la variable obtenida.

Finalmente, mediante los resultados obtenidos, se realizó una matriz de comparación, la cual agrupaba las eficiencias obtenidas con las diferentes geometrías, en torno a las diferentes variables de estudio (velocidad, fracción de producción de vapor y número de cavitación) (figura 1).

Fig 2. Clasificación de los puntajes de las geometrías de acuerdo a su comportamiento en cada variable.



Fuente: autor

De esta forma, se obtuvieron los resultados por cada geometría, teniendo en cuenta los parámetros mencionados previamente (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de evaluación estándar (resultado consolidado).

Tipo de geometría	Sumatoria
I	52
II	51
III	60
IV	26
V	25
VI	42
VII	19
VIII	29
IX	32
X	47
XI	41
XII	41

Fuente: Autor

Conclusiones

Se realizó la simulación del fenómeno de cavitación, teniendo en cuenta diferentes geometrías empleando el paquete de simulación hidrodinámica FLUENT 19.0, en donde se determinaron los efectos ocasionados por algunos parámetros físicos y geométricos dentro de la producción de la actividad cavitacional.

Como consecuencia de lo anterior se determinó la eficiencia en la consecución de la cavitación, considerando algunos parámetros geométricos. Entre estos parámetros se estableció, de acuerdo a las simulaciones, para una geometría tipo Venturi circular (diámetro de entrada de 50.8 mm y diámetro de la constricción de 3 mm), una longitud óptima de la boquilla de 1 mm, trabajando junto con un ángulo de divergencia de 7.5° (geometría III)

Referencias

- [1] Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. (2015). Estudio nacional del agua 2014. Bogotá: IDEAM.
- [2] Brennen, C. (1995). *Cavitation and bubble dynamics*. New York: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
- [3] Brennen, C. (2005). *Fundamentals of multiphase flow*. New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807169>
- [4] Charrière, B., Decaix, J., & Goncalvès, E. (2015). A comparative study of cavitation models in a Venturi flow. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 49(PA), 287–297. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.10.003>
- [5] Kuldeep, & Saharan, V. K. (2016). Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. *Journal of Hydrodynamics*, 28(2), 293–305. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60631-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60631-5)
- [6] Bashir, T. A., Soni, A. G., Mahulkar, A. V., & Pandit, A. B. (2011). The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(6), 1366–1375. <https://doi.org/10.1002/cjce.20500>
- [7] Yi, C., Lu, Q., Wang, Y., Wang, Y., & Yang, B. (2018). Degradation of organic wastewater by hydrodynamic cavitation combined with acoustic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 43, 156–165. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2018.01.013>
- [8] Gogol, M., Przyjazny, A., & Boczkaj, G. (2018). Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. *Chemical Engineering Journal*, 338, 599–627. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2018.01.049>
- [9] Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. (2016). Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(5), 433–468. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032>
- [10] Tukimin, A., Zuber, M., & Ahmad, K. A. (2016). CFD analysis of flow through Venturi tube and its discharge coefficient. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 152(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012062>
- [11] Simpson, A., & Ranade, V. V. (2018). Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs. *Chemical Engineering Research and Design*, 136, 698–711. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.06.014>
- [12] He, N., & Zhao, Z. (2010). Theoretical and numerical study of hydraulic characteristics of orifice energy dissipator. *Water Science and Engineering*, 3(2), 190–199. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.007>
- [13] Ai, W., & Ding, T. (2010). Orifice plate cavitation mechanism and its influencing factors. *Water Science and Engineering*, 3(3), 321–330. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.03.008>
- [14] Nurick, W. H. (1976). Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing. *Journal of*

- Fluids Engineering, 98(4), 681.
<https://doi.org/10.1115/1.3448452>
- [15] Saharan, V. K., Rizwani, M. A., Malani, A. A., & Pandit, A. B. (2013). Effect of geometry of hydrodynamically cavitating device on degradation of orange-G. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 345–353.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.08.011>
- [16] Ferziger, J., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. New York: Springer-Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-97651-3_1
- [17] Jain, T., Carpenter, J., & Saharan, V. K. (2014). CFD Analysis and Optimization of Circular and Slit Venturi for Cavitation Activity. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 1(1), 28–33