

## ESTUDIO DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA CON IMPULSOR SEMIABIERTO DE FLUJO RADIAL

López Medina Armando, Chávez López Óscar Arturo, Rosas Yescas Israel

Ambriz Diaz Víctor Manuel

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Chihuahua

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Av. Tecnológico #2909, Chihuahua, Chih.

614-201-2000

[123061112@chihuahua.tecnm.mx](mailto:123061112@chihuahua.tecnm.mx), [israel.ry@chihuahua.tecnm.mx](mailto:israel.ry@chihuahua.tecnm.mx), [oscar.cl@chihuahua.tecnm.mx](mailto:oscar.cl@chihuahua.tecnm.mx),  
[victor.ad@chihuahua.tecnm.mx](mailto:victor.ad@chihuahua.tecnm.mx)

### RESUMEN.

Este trabajo muestra el análisis de la operación de una bomba centrífuga con un impulsor semi abierto de flujo radial bajo condiciones de operación cercanas a la cavitación. Se realizaron simulaciones computacionales con parámetros que representan condiciones próximas al NPSH mínimo requerido por el fabricante. Las simulaciones se efectuaron para tres diferentes caudales, el caudal máximo, el caudal del mejor punto de operación de acuerdo con la información técnica de la bomba y para un caudal establecido como mínimo. Se obtuvieron los campos de presión en el impulsor para cada condición, con lo cual se analizó la distribución de la presión del fluido en la región del impulsor. Los resultados obtenidos permiten visualizar bajo qué condiciones específicas de carga se desarrolla la cavitación. Las simulaciones mostraron que el NPSHr proporcionado por el fabricante, presenta un margen de seguridad considerable antes de que exista probabilidad de cavitación en la bomba. Además, los resultados logrados permiten determinar los valores críticos de operación previos al desarrollo de la cavitación. Adicionalmente, con los campos de presión obtenidos mediante las simulaciones, se determinó que las zonas donde comienza a desarrollarse la cavitación es la parte interna de los álabes de impulsor.

Palabras clave: Cavitación, Simulaciones, NPSH.

### ABSTRACT.

This paper shows the analysis of the operation of a centrifugal pump with a semi-open radial flow impeller under operating conditions close to cavitation. Computational simulations were performed with parameters that represent conditions close to the minimum NPSH required by the manufacturer. The simulations were carried out for three different flow rates, the maximum flow rate, the flow rate of the best operating point according to the technical information of the pump and for a minimum established flow rate. The pressure fields in the impeller for each condition were obtained, with which the fluid pressure distribution in the impeller region was analyzed. The results obtained allow us to visualize under which specific load conditions cavitation develops. The simulations showed that the NPSHr one provided by the manufacturer presents a considerable margin of safety before there is a probability of cavitation in the pump. In addition, the results obtained allow the determination of the critical operating values prior to the development of cavitation. Additionally, with the

pressure fields obtained through the simulations, it was determined that the areas where cavitation begins to develop is the internal part of the impeller blades.

Keywords: Cavitation, Simulations, NPSH.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las bombas centrífugas son a nivel global la máquina rotodinámica más utilizada para el transporte de fluidos, en ellas se emplean el 22% de los motores eléctricos producidos en el mundo [1]. Sus aplicaciones principales son en la extracción para abastecer el consumo de agua y para el riego en los campos agrícolas, son además indispensables en los sistemas de bombeo para el aumento de presión en los sectores domésticos, institucional e industrial [2].

Uno de los problemas más importantes que deben tenerse en cuenta en el dimensionamiento y la operación de una bomba centrífuga es la cavitación, la aparición de esta, afecta el rendimiento, la operación, la estabilidad y la vida útil de la bomba [3]. Por lo anterior es de suma relevancia que en la infraestructura de un sistema de bombeo se evite una instalación que favorezca la cavitación.

Durante la operación de la bomba centrífuga, en el área de paso de flujo, el líquido transportado incrementa su velocidad y disminuye su presión, si la presión del fluido alcanza un valor menor al de su presión de vapor, se presenta la cavitación, lo que provoca la formación de burbujas [4]. Con el flujo, las burbujas viajan por el impulsor y cuando llegan a la región de mayor presión colapsan e implotan intensamente. Este proceso de desarrollo y colisión de las burbujas puede formar micro chorros de alta velocidad que impactan sobre la pared sólida del impulsor. Las ondas de choque de la implosión y la fuerza de impacto de los micro chorros forman hoyos micrométricos en las paredes sólidas, la acumulación de estos hoyos por la incidencia del fenómeno causa desprendimiento de material en el impulsor y su posterior deformación.

Otro efecto de la cavitación es el hecho de que la abundancia de burbujas puede bloquear parcialmente el canal de paso de flujo, lo que provoca pérdida de energía, originando deterioro en el rendimiento hidráulico de la bomba, lo que se manifiesta en una

disminución de la altura de impulsión, capacidad y eficiencia, además de efectos de vibración y ruido [4].

Los efectos nocivos mencionados, han motivado a la realización de diversas investigaciones basadas en modelado numérico y métodos experimentales para la detección temprana de la cavitación. Los métodos experimentales se enfocan principalmente en las señales características de una bomba en estado de cavitación, como son las señales de vibración, señales de corriente eléctrica del motor y de las bandas laterales de corriente del estator, señales de presión sonora o nivel de ruido [5]. Es decir, los métodos experimentales analizan el comportamiento de la bomba una vez que la cavitación está presente.

El objetivo de este estudio es la realización de simulaciones numéricas para la captura del detalle del flujo interno en los componentes principales de paso de flujo de una bomba centrífuga. Las simulaciones se realizan en condiciones de operación próximas a la aparición de cavitación con base en la información proporcionada por el fabricante. Lo anterior con el fin de detectar en los componentes internos de la bomba el posible inicio y desarrollo de la cavitación cuando las condiciones de la instalación lo determinen.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se analiza el desempeño de la bomba centrífuga de impulsor abierto y flujo radial de la figura 1. Los datos de placa de la bomba son: flujo y carga máximos,  $0.0023 \text{ m}^3/\text{s}$  con  $20\text{m}$ , flujo y carga en su mejor punto de eficiencia (BEP por sus siglas en inglés),  $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$  con  $11.5\text{m}$ , La bomba opera a  $3450 \text{ rpm}$ , accionada por un motor eléctrico de  $0.37 \text{ kW}$ , a un voltaje de  $230 \text{ V}$ , 1 fase.

El análisis es desarrollado mediante la realización de simulaciones computacionales basadas en el método de elementos finitos, utilizando el software SOLID WORKS.



Figura 1.- Bomba centrífuga del análisis, con impulsor semiabierto de flujo radial.

## 3. MARCO TEÓRICO.

### 3.1. La bomba centrífuga.

Una bomba centrífuga es una turbomáquina hidráulica que agrega energía a un fluido, aumentando la energía cinética como resultado de la deflexión y el efecto centrífugo provocado por los álabes del impulsor, el cual se desplaza siempre con movimiento rotativo. Posteriormente, el fluido pasa a la zona delimitada por la voluta donde la energía es recuperada en forma de presión.

### 3.2. Cavitación.

En la bomba centrífuga, la cavitación se produce debido a la aceleración del fluido como resultado de la transformación del trabajo de los álabes del impulsor en energía cinética. De acuerdo con el principio mecánico de conservación de la energía, cuando el fluido incrementa la velocidad, disminuye su presión. Cuando la presión cae por debajo del valor de la presión de vapor saturado del fluido a la temperatura prevaleciente, se inicia un proceso de intermitencia y posterior vaporización del fluido dando lugar a la formación de burbujas. Con el flujo, las burbujas viajan por el impulsor y cuando llegan a una región de mayor presión colapsan e implotan generando presiones transitorias extremadamente altas del orden de  $1 \text{ GPa}$  [7], en un periodo aproximado de  $0.003\text{s}$  [8].

### 3.3. NPSH.

Para determinar el potencial de cavitación en una bomba centrífuga, se emplea el concepto de la carga de succión positiva neta o *NPSH* (por sus siglas en inglés), mediante el cual se calcula la energía utilizable en la brida de succión de la bomba. El *NPSH* se divide en *NPSH<sub>d</sub>* o disponible, y en *NPSH<sub>r</sub>* o requerido.

Por una parte, el *NPSH<sub>d</sub>* representa la energía del fluido en la succión de la bomba y debe ser mayor a la energía del fluido debida a su presión de vapor para asegurar que este no se vaporice en la línea de succión. El valor del *NPSH<sub>d</sub>* depende netamente de los componentes y de la instalación de la bomba con respecto al depósito de succión, por otro lado, el *NPSH<sub>r</sub>* establece el valor mínimo de presión que debe existir en la entrada de la bomba, este parámetro es determinado en pruebas experimentales y proporcionado por el fabricante de la bomba debido a que es propio del diseño y depende principalmente de su geometría, el número de álabes del impulsor, la velocidad de rotación, así como de las propiedades del fluido y el caudal. Para evitar la cavitación en una bomba, debe cumplirse que:  $NPSH_d > NPSH_r$  adicionando  $0.50\text{m}$  como en metros de columna de agua como factor de seguridad.

Los parámetros de las simulaciones reflejan valores de *NPSH<sub>d</sub>* cercanos a la condición de cavitación. De acuerdo con la información proporcionada por el fabricante, la bomba de este estudio debe disponer de una carga mínima en la succión de  $3.00\text{m}$ . Es decir  $NPSH_r = 3.00\text{m}$ .

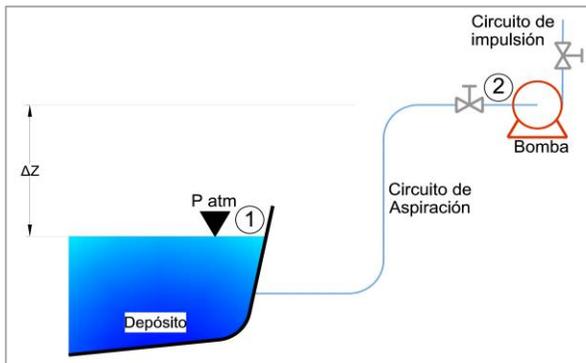


Figura 2.- Esquema representativo de circuito de bombeo.

En un sistema de bombeo como el de la Figura 2, la ecuación de la energía de Bernoulli de la sección de aspiración que va del depósito de almacenamiento a la entrada de la bomba está determinada por:

$$\frac{P_{2ab}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \Delta z + \frac{P_{atm}}{\gamma} - h_{r1-2}, \quad (1)$$

donde  $P_{2ab}$  es la presión absoluta en 2,  $\gamma$  es el peso específico del fluido,  $V_2$  la velocidad del fluido en 2,  $P_{atm}$  el valor de la presión atmosférica,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $h_{r1-2}$  las pérdidas de carga de 1 a 2.

Partiendo de la definición de  $NPSH$  como la carga hidráulica disponible en la brida de succión de la bomba, menos la carga de presión de vapor en la misma sección, tenemos de la sección izquierda de la ecuación (1) que:

$$NPSHd = \frac{P_{2ab} - P_v}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}, \quad (2)$$

Donde  $P_v$  es la presión de vapor del fluido bombeado. A partir de la sección derecha de la ecuación (1) definimos el  $NPSHd$  en términos de diferencia de elevación  $\Delta z$ , como:

$$NPSHd = \Delta z + \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - h_{r1-2}, \quad (3)$$

El criterio más empleado establecido en la norma API 610 define el inicio de la cavitación cuando se presenta una caída del 3% en la carga entregada por la bomba [6].

Para determinar qué tan próxima se encuentra la bomba de entrar en cavitación bajo las condiciones de su mejor punto de operación, se establece un factor de seguridad  $F_s$ , el cual queda de finido de la siguiente manera:

$$F_s = \frac{NPSHr}{NPSHcrit}, \quad (4)$$

donde  $NPSHr$  es el valor de carga que proporciona el fabricante

y  $NPSHcrit$  es el valor de la carga justo al inicio de la cavitación. Este valor crítico se determina a partir de las simulaciones cuando el campo de presiones en el impulsor presenta algún punto donde la presión mínima es igual o menor que la presión de vapor del fluido.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

### 4.1. Resultados obtenidos con las simulaciones.

En la gráfica de la figura 3 se presentan los resultados de las simulaciones para las combinaciones de cada uno de los valores de carga en la succión con los 3 valores de flujo. En esta gráfica se observa que, para el flujo máximo, la presión mínima cae por debajo del valor de presión de vapor del agua cuando la carga disminuye de 2.00m a 1.50m lo que da lugar a la presencia de cavitación.

Por otro lado, para los valores simulados de flujo  $Q_{BEP}$  los parámetros de presión mínima obtenidos en ningún caso son menores a la presión de vapor  $P_v$  en todo el intervalo simulado. El tercer valor de caudal simulado representado en la gráfica es el de  $Q_{min}$  donde se observa una disminución progresiva de la presión mínima con una pendiente moderada. Presentándose cavitación en el intervalo de 2.00m a 1.50m.

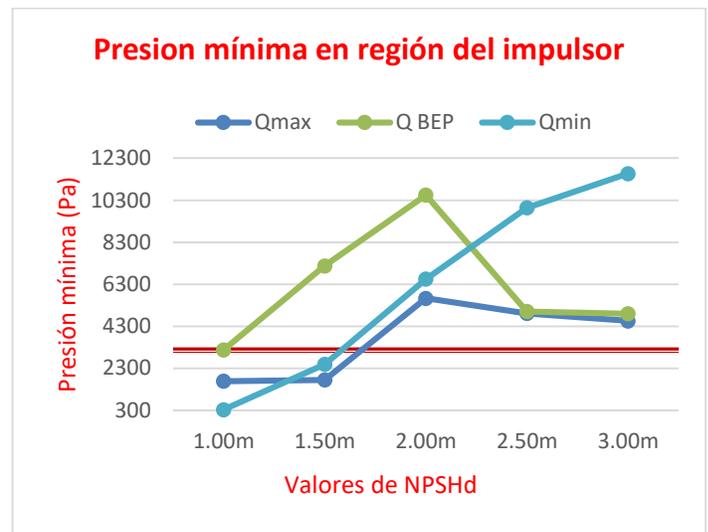


Fig. 3. Valores mínimos de presión obtenidos para cada caudal en función del  $NPSHd$ .

En las figuras 4, 5 y 6 se muestra la distribución de presión en la sección transversal de la bomba para los caudales  $Q_{max}$ ,  $Q_{BEP}$  y  $Q_{min}$ . Las figuras muestran el campo de presiones cuando  $NPSHd = 1.00m$ . Se observa que con esta carga en la succión para el caudal máximo y mínimo se presenta cavitación, mientras que para el mejor punto de operación no hay muestras de presencia de este fenómeno.

De acuerdo con la escala de colores, se observa además, como se hace evidente, que los valores de más baja presión se presentan en la parte cóncava de los álabes del impulsor.

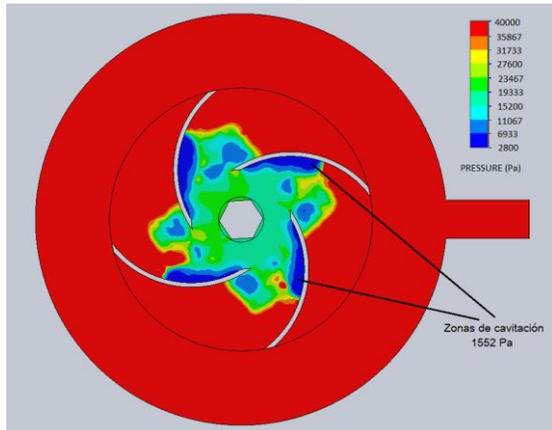


Fig. 4. Cavitación desarrollada en la región del impulsor para  $Q_{max} = 0.0023 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $NPSHd = 1.00\text{m}$

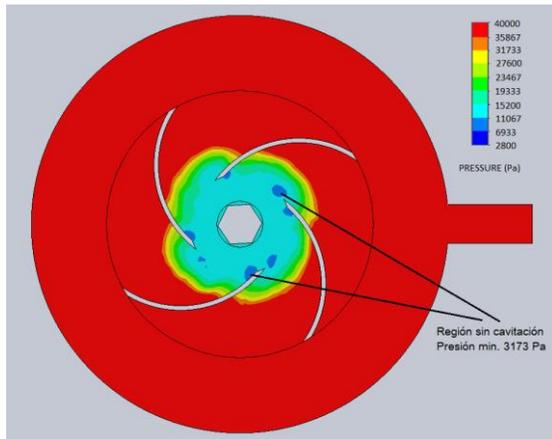


Fig.5. Distribución de presión con valores mínimos próximos a la presión de vapor para  $Q_{BEP} = 0.001 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $NPSHd = 1.00\text{m}$ .

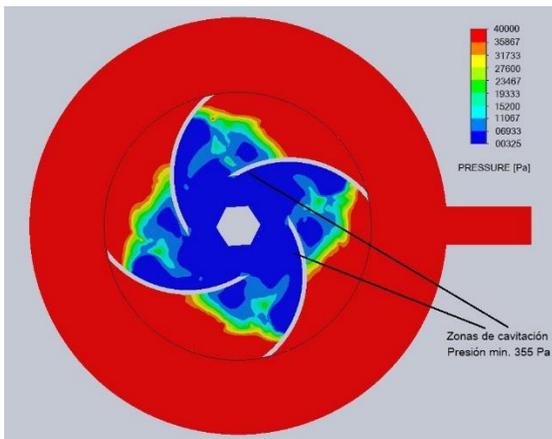


Fig.6. Cavitación desarrollada en toda la región del impulsor resultado de  $Q_{min} = 0.0008 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $NPSHd = 1.00\text{m}$ .

Las figuras 7 y 8 representan un corte del cuerpo hidráulico donde se simulan la presión y la velocidad de la bomba en cavitación con  $Q_{max} = 0.0023 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $NPSHd = 1.00\text{m}$ , en éstas podemos observar, que el área de menor presión se encuentra en la región del impulsor y es donde se presenta la velocidad más elevada.

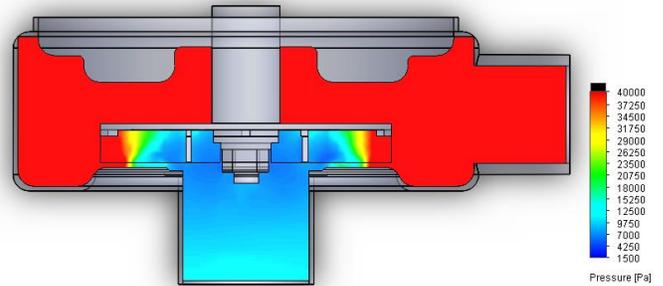


Fig. 7. Distribución de presiones, bomba con Cavitación desarrollada.

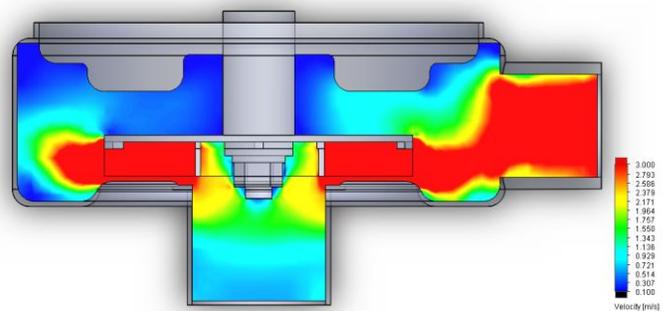
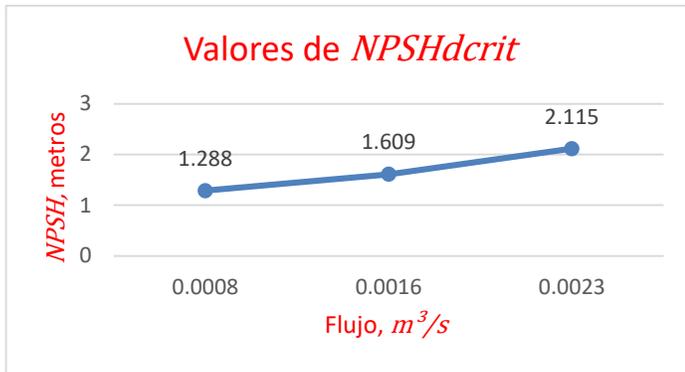


Fig. 8. Perfil de velocidades, bomba con Cavitación desarrollada.

#### 4.3. Valor crítico y factor de seguridad

Los valores de  $NPSHd_{crit}$  se determinaron a partir de los campos de presión obtenidos en las simulaciones del  $NPSHd$ . Cuando la presión mínima en el impulsor muestra valores muy cercanos o por debajo de la presión de vapor, se toma el  $NPSHd$  simulado como crítico, esto debido a que tales condiciones indican una alta probabilidad de que la bomba presente cavitación. Partiendo de lo anterior, una vez que tenemos el  $NPSHd_{crit}$  podemos calcular el factor de seguridad. La gráfica de la figura 9 muestra los valores críticos de la carga para 3 caudales. Se observa que a medida que aumenta el flujo demandado a la bomba, es necesario incrementar la carga en la succión para evitar que esta entre en cavitación.

De esta manera, se tiene que tomando la recomendación del fabricante de un  $NPSHr = 3.00\text{m}$ , en el rango del mejor punto de operación de la bomba, el factor de seguridad obtenido es  $FS = 1.86\text{m}$ .

Fig. 9. Valores de  $NPSH_{dcrit}$ .

## 5. CONCLUSIONES.

Se realizó la simulación de una bomba centrífuga de impulsor semiabierto de flujo radial bajo condiciones de  $NPSH_d$  próximos a la cavitación. Se obtuvieron los campos de presión del fluido en la región del impulsor para cada valor de  $NPSH_d$  simulado en la bomba. Se observó que para los caudales máximo y mínimo, el valor de  $NPSH_d$  para evitar que se presente cavitación debe ser mayor comparado con el  $NPSH_d$  del mejor punto de operación. Para los dos caudales mencionados se observa que hay mayores probabilidades de cavitación cuando el  $NPSH_d$  es menor a 2.00m mientras que para el  $Q_{BEP}$  estas condiciones se alcanzan con un  $NPSH$  muy próximo a 1.00m. Los resultados también muestran que cuando la bomba es operada con el caudal del punto de mejor eficiencia y respetando el  $NPSH_r$  dado por el fabricante, se tienen un margen de seguridad considerable próximo a 2.00m que previene la aparición de la cavitación.

De lo anterior tenemos que para los valores de flujo máximo y mínimo la presión del fluido se torna crítica y cae por debajo de su presión de vapor en un rango relativamente corto de valores  $NPSH_d$ , entrando la bomba en cavitación. Esto no sucede para un flujo en el mejor punto de operación de la bomba, donde es más amplio el rango para los valores de  $NPSH_d$  sin que inicie el proceso de cavitación. Con las gráficas de distribución de presiones se logra apreciar que las áreas de menor presión se presentan precisamente en la parte interna de los alabes del impulsor, donde de acuerdo con la información introductoria de este artículo se tienen los efectos nocivos de la cavitación.

Las simulaciones realizadas permiten determinar de mejor manera las condiciones que mantienen a la bomba centrífuga operando fuera de la región de cavitación.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] C. A. Fontalvo Conrado, R. Pineda Arrieta, and J. Duarte Forero, "Optimización energética de bombas centrífugas a través de un análisis paramétrico en CFD y modelos de pérdida de energía," *INGE CUC*, vol. 16, no. 1, 2020, doi: 10.17981/ingecuc.16.1.2020.01.
- [2] M. Güner and M. M. Özbayer, "Wear and its effects in centrifugal pumps," *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, vol. 29, no. 3, 2019, doi: 10.29133/yyutbd.518139.
- [3] J. Lu, S. Yuan, Y. Luo, J. Yuan, B. Zhou, and H. Sun, "Numerical and experimental investigation on the development of cavitation in a centrifugal pump," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 230, no. 3, 2016, doi: 10.1177/0954408914557877.
- [4] W. Xu, X. He, X. Hou, Z. Huang, and W. Wang, "Influence of wall roughness on cavitation performance of centrifugal pump," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 6, 2021, doi: 10.1007/s40430-021-03023-3.
- [5] P. Samanipour, J. Poshtan, and H. Sadeghi, "Cavitation detection in centrifugal pumps using pressure time-domain features," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 25, no. 5, 2017, doi: 10.3906/elk-1701-2.
- [6] R. Ramadevi, "Net positive suction head analysis for testing the condition of a centrifugal pump," *Indian J Sci Technol*, vol. 8, no. 10, 2015, doi: 10.17485/ijst/2015/v8i10/55333.
- [7] C. Guo, "The Relationship between the Collapsing Cavitation Bubble and Its Microjet near a Rigid Wall under an Ultrasound Field," in *Cavitation - Selected Issues*, 2018, doi: 10.5772/intechopen.79129.
- [8] M. Chudina, "Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump," *Acoust Phys*, vol. 49, no. 4, 2003, doi: 10.1134/1.1591303.