

## Estudio mediante simulación del efecto hidrodinámico del número de válvulas de impulso en las características operativas de una bomba de ariete hidráulico

Fran Reinoso-Avecillas<sup>1</sup>, Nelson Jara-Cobos<sup>2</sup>, Olena Leonidivna Naidiuk<sup>3</sup>, Jorge Brito-Tigre<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones, Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [njara@ups.edu.ec](mailto:njara@ups.edu.ec)

<sup>2</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [freinoso@ups.edu.ec](mailto:freinoso@ups.edu.ec)

<sup>3</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [oneira@ups.edu.ec](mailto:oneira@ups.edu.ec)

<sup>4</sup>Graduado de la Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: [jbritot@est.ups.edu.ec](mailto:jbritot@est.ups.edu.ec)

### Resumen

El propósito del presente trabajo de investigación es realizar el estudio mediante simulación del efecto hidrodinámico del número de válvulas de impulso en las características operativas de una bomba de ariete hidráulico. Para lo cual, se identifica y caracteriza un caso de estudio, se construye el modelo físico, se determina el dominio computacional y se establece las condiciones de contorno para generar el mallado. Utilizando el software Ansys Fluent, mediante un estudio bidimensional se simula el caso base y varios escenarios incrementando el número de válvulas de impulso. Los resultados de la simulación muestran que, al aumentar el número de válvulas de impulso a tres, el rendimiento de la bomba de ariete hidráulico aumenta alcanzando un valor de 24,11 % con respecto al rendimiento del 4,3 % de la bomba de ariete hidráulico de una sola válvula de impulso.

**Palabras clave:** Ariete hidráulico, Válvula impulso, Fluent

### Abstract

The purpose of this research work is to carry out the study through simulation of the hydrodynamic effect of the number of impulse valves on the operating characteristics of a hydraulic ram pump. For which, a case study is identified and characterized, the physical model is built, the computational domain is determined and the boundary conditions are established to generate the mesh. Using the Ansys Fluent software, a two-dimensional study simulates the base case and several scenarios by increasing the number of impulse valves. The simulation results show that by increasing the number of impulse valves to three, the efficiency of the hydraulic ram pump increases reaching a value of 24.11% compared to the 4.3% efficiency of the ram pump. Hydraulic single boost valve.

**Keywords:** Hydraulic ram, Impulse valve, Fluent

## 1. Introducción

El abastecimiento de agua para consumo humano y riego en zonas rurales alejadas a nivel mundial, enfrenta múltiples desafíos que comprometen el bienestar y el desarrollo de estas comunidades [1][2][3]. Las fuentes de agua a pesar de ser abundantes en estas zonas, a menudo están ubicadas a grandes distancias y presentan problemas de contaminación, lo que incrementa los riesgos sanitarios. Además, la infraestructura hídrica suele ser deficiente o inexistente, dificultando el acceso permanente y seguro al agua [2][3].

Por otro lado, la dependencia de fuentes de energía convencionales para el bombeo de agua resulta costosa, especialmente en regiones con acceso limitado a la electricidad. En este contexto, tecnologías como la del ariete hidráulico, que aprovechan la energía hidráulica sin necesidad de energía externa, se presenta como una solución viable y sostenible, por lo que es esencial maximizar su eficiencia y difundir el uso de esta tecnología, para mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales y promover el desarrollo agrícola sostenible principalmente en América Latina [3] [4].

El bombeo mediante ariete hidráulico, es una tecnología que data del siglo XVIII. Su simplicidad mecánica y la capacidad de operar sin una fuente de energía externa han mantenido su relevancia en aplicaciones contemporáneas. Sin embargo, la optimización de sus componentes y el entendimiento profundo de su comportamiento hidrodinámico aún representan desafíos técnicos significativos [5] [6].

En un ariete hidráulico, el número y disposición de las válvulas de impulso son elementos críticos que influyen directamente en su funcionamiento y rendimiento. Las válvulas de impulso regulan el flujo de agua y la creación de ondas de presión dentro del sistema, afectando el ciclo de funcionamiento del ariete y, en última instancia, su capacidad para elevar agua a alturas deseadas [6] [7].

El presente estudio se enfoca en el análisis y la simulación computacional del efecto hidrodinámico del número de válvulas de impulso en las características operativas de una bomba de ariete hidráulico. Utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), se busca modelar y simular diferentes configuraciones de válvulas para entender cómo estos cambios afectan a parámetros clave como la eficiencia global, las pérdidas de energía y la estabilidad del flujo.

Mediante simulaciones detalladas, este trabajo tiene como objetivo proporcionar un marco teórico y práctico para la optimización del diseño de arietes hidráulicos. Se espera que los resultados obtenidos no

solo mejoren la comprensión del comportamiento interno de estos sistemas, sino que también aporten recomendaciones concretas para la mejora de su rendimiento, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías de bombeo de agua más eficientes y sostenibles.

La metodología empleada incluirá la creación de modelos geométricos detallados del ariete, la configuración de condiciones de contorno realistas basadas en datos experimentales y la utilización de software avanzado de CFD para ejecutar las simulaciones. Los resultados serán analizados en términos de los patrones de flujo másico y volumétrico, las distribuciones de presión obtenidas para cada configuración de válvulas de impulso.

En conclusión, este estudio pretende establecer una relación clara entre el número de válvulas de impulso y el rendimiento de la bomba de ariete hidráulico, ofreciendo así una guía técnica para su diseño y aplicación en diversas condiciones operativas.

## 2. Materiales y métodos

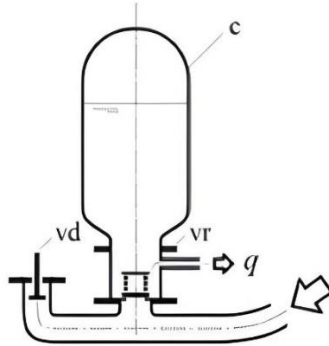
### 2.1. Principio de operación de la bomba de ariete hidráulico

La bomba de ariete hidráulico es un motor hidráulico que utiliza la energía de una cantidad de líquido (comúnmente agua) situada a una altura mayor (el desnivel de un río, presa, acequia u otro depósito), con el objetivo de elevar una porción de esa cantidad de líquido hasta una altura mayor que la inicial, mediante el empleo del fenómeno físico conocido como golpe de ariete [8].

La bomba de ariete (ver Figura 1), es una máquina hidráulica que no necesita ningún tipo de fuente primaria de energía, ya sea recibida de un motor o de un fluido auxiliar. Esta bomba aprovecha el empuje de una corriente descendente de agua para inducir un golpe de ariete controlado, cuya sobrepresión es retenida en un acumulador (*c*). La bomba incorpora, válvulas de descarga o desagüe (*vd*) y de retención (*vr*), cuya dinámica de apertura y cierre, regulación y tarado se correlacionan con la presión y con el caudal [9][10].

El golpe de ariete se provoca cuando una corriente de agua alcanza un valor preestablecido, regulada por el cierre de la válvula de desagüe. La sobrepresión consiguiente abre la válvula de retención y da paso al fluido hacia el interior del calderín. Al entrar el golpe en la fase de depresión, la válvula de retención se cierra aislando el caudal derivado del circulante y, una vez en reposo, la válvula de desagüe se abre por su peso o por la acción de un muelle, dando lugar al inicio de otro ciclo. La repetición de este proceso hace que la presión

de salida del tanque acumulador sea pulsante y se utilicen depósitos de aforo para acumular el fluido [10][11].



**Figura 1.** Esquema de bomba de ariete hidráulico.  
Fuente:[3].

En función del esquema básico de la bomba de ariete hidráulico de caudal fijo, se han desarrollado variantes en su diseño con la intención de mejorar sus condiciones operativas como son el ariete hidráulico multiválvulas de caudal variable y ariete hidráulico multipulsor [11].

## 2.2. Ariete hidráulico multipulsor

El ariete hidráulico multipulsor, consiste en la implementación de válvulas de impulsión colocadas en serie en la tubería principal de entrega, para aprovechar así el caudal disponible y la energía remanente que normalmente se desperdicia en un ariete convencional de una sola válvula, obteniendo así una mejora en el rendimiento [12].

El principio de funcionamiento del ariete hidráulico multipulsor, no difiere del ariete convencional. El flujo volumétrico se reparte entre las válvulas cumpliendo con la condición [13]:

$$Qv1 = Qv2 = Qv3 = \dots Qvn \quad (1)$$

Donde:  $Qv$ , es el caudal que atraviesa por las válvulas. Al ubicar las válvulas en serie, la ganancia energética importante, debido a que se va a levantar dos o más masas de menor tamaño, que descienden desfasadas en tiempo, provocando a su vez un incremento de la presión hidrodinámica para un mismo ciclo, esto se debe que al levantar la primera válvula existe una energía remanente que si no existieran las otras válvulas se desperdiciaría haciendo que la tubería de entrada se desgaste más rápidamente [13].

Adicionando válvulas, se mantiene la ventaja de combatir los principales problemas operativos del ariete hidráulico convencional como son: el excesivo peso de la máquina, grandes volúmenes de agua para su funcionamiento y su baja eficiencia [13] [14].

La eficiencia de una bomba de ariete está definida por la ecuación (2),.

$$\eta = n_u/n_b \quad (2)$$

Donde:  $n_u$ , es la potencia útil entregada y  $n_b$  la potencia recibida (absorbida) del agua. Para el cálculo de potencia útil entregada en la descarga  $n_u$ , se emplea la siguiente ecuación:

$$n_u = Q_b * P_s * g * \rho \quad (3)$$

Donde:  $Q_b$ , el caudal de bombeo en  $m^3/s$ ,  $P_s$ , es la presión de salida generada por el ariete;  $g$ , la aceleración de la gravedad ( $9.81 m/s^2$ ), y  $\rho$  la densidad del agua ( $1000 kg/m^3$ ). De igual manera para calcular la potencia absorbida del agua,  $n_b$  se determina a partir de la ecuación (4).

$$n_b = Q_i * P_i * g * \rho \quad (4)$$

Donde:  $Q_i$ , es el caudal de entrada al ariete hidráulico,  $P_i$ , la presión en el ingreso del ariete

## 2.3. Ecuaciones de gobierno

El flujo de agua en la tubería de entrega del ariete, puede ser considerado como un flujo viscoso donde los fenómenos de transporte disipativos de la fricción, la conducción térmica y/o difusión masiva están incluidos; mismos que siempre provocarán un aumento de la entropía del flujo. Para analizar y modelar el campo de viento se debe resolver las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos como son las ecuaciones de conservación de la masa, la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, para flujo viscoso considerando ciertas restricciones establecidas en las ecuaciones de Navier-Stokes [15][16].

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho(\nabla \cdot V) = 0 \quad (5)$$

$$\rho c \frac{dT}{dt} = -p\nabla \cdot V + \nabla \cdot (k \nabla T) + \phi_v \quad (6)$$

$$\rho \frac{DV}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}' + \rho f \quad (7)$$

Donde:  $\rho$  es la densidad,  $V$  es el vector velocidad,  $c$  es el calor específico a volumen constante,  $T$  es la

temperatura,  $p$  es la presión,  $k$  es la conductividad térmica,  $\phi_v$  es el trabajo realizado por las fuerzas viscosas,  $\bar{\tau}$  es el tensor de esfuerzos viscosos, y  $\mathbf{f}$  es el vector de fuerzas másicas por unidad de volumen. La derivada material en el lado izquierdo de la ecuación, representa el vector de aceleración, se puede reemplazar con la suma de las aceleraciones locales y de convección

## 2.4. Modelado computacional del ariete hidráulico

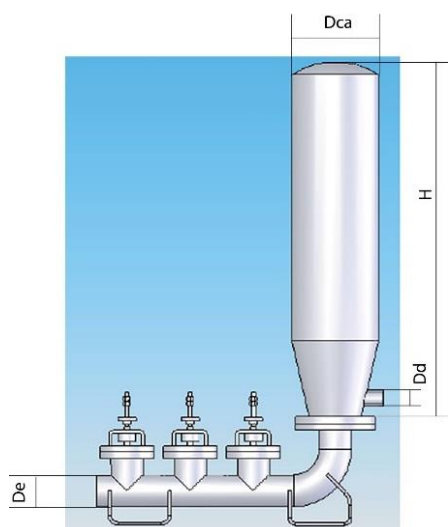
En este apartado se describe el proceso de simulación numérica del prototipo de ariete hidráulico multipulsor, utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), del inglés *Computational Fluid Dynamic*. El estudio numérico se realiza utilizando los datos y configuración del ariete hidráulico multipulsor presentado en [18], tomado como caso de estudio en esta investigación.

## 2.5. Herramienta computacional

Para elaborar el modelo físico de ariete hidráulico multipulsor, se utilizó el software CAD de modelado 3D Autodesk Inventor® 2020. Para el modelado numérico con CFD de flujo de agua en la bomba de ariete, se emplea el software especializado ANSYS FLUENT® 2020 R2.

## 2.6. Modelo físico

En la Figura 2, se presenta el diseño CAD del modelo físico de la bomba de ariete hidráulico multipulsor tomado como caso de estudio.



**Figura 2.** Modelo físico del caso de estudio. Fuente: Adaptado de [18]

En la Tabla 1, se presenta las dimensiones generales de la bomba de ariete hidráulico multipulsor.

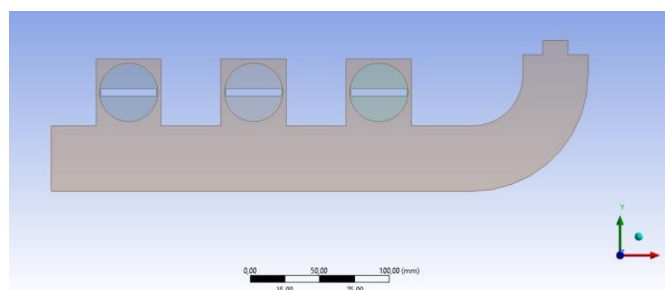
**Tabla 1.** Dimensiones principales del ariete hidráulico.

Denominación	Dimensiones [pulg.]
Diámetro de entrada ( $D_e$ )	2
Diámetro válvula check ( $D_{vc}$ )	1
Diámetro de cámara de aire ( $D_{ca}$ )	6
Altura cámara de aire ( $H$ )	20
Diámetro de descarga ( $D_d$ )	1

Fuente: Tomado de [18]

## 2.7. Dominio computacional

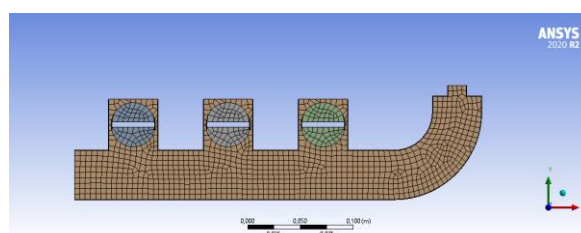
El dominio computacional se define a partir del diseño CAD de la bomba de ariete hidráulico multipulsor establecido en el apartado anterior. Con el fin de reducir el costo computacional, utilizando el módulo Design Modeler de ANSYS Workbench, se define un modelo computacional en 2D como se observa en la Figura 3, mismo que se considera suficiente para modelar el flujo de agua en la bomba de ariete hidráulico.



**Figura 1.** Dominio computacional 2D bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor. Fuente: Autoría Propia.

## 2.8. Mallado del dominio computacional

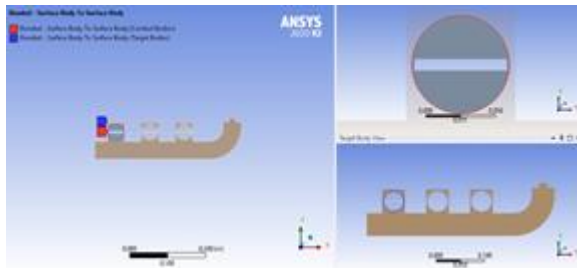
Se genera una malla en 2D con elementos gobernantes de la forma de cuadriláteros, basado en el método de volúmenes finitos (MVF). En la Figura 4, se observa el mallado del dominio computacional, cuyos elementos durante el proceso de optimización cambiarán de forma dependiendo de la región en la que se encuentren.



**Figura 2..** Malla de dominio computacional de bomba ariete hidráulico. Fuente: Elaboración propia.

El mallado es de tipo no estructurado, con un total óptimo de 685782 elementos. En el dominio de cada

válvula se independiza realizando un *sizing* para poder manipular a futuro cada una de las partes. Para simular el efecto de malla en movimiento se crean regiones de contacto entre la válvula y el asiento que esta estático. Esto permite que la información se transfiera de un cuerpo a otro, por lo que los elementos de mallado entre estas dos zonas deben ser similares. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra las de la malla móvil.



**Figura 5.** Características de malla móvil en región de contacto válvula de impulso 1. Fuente: Elaboración propia.

En el estudio de convergencia o independencia de malla, se realiza la discretización o refinamiento de elementos, tomando como variable la presión de descarga de la bomba de ariete. En la Tabla 2, se presenta los resultados del proceso de discretización.

**Tabla 2.** Errores de discretización en mallado de dominio computacional de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor.

Malla /Caso	Número elementos	Tamaño elementos [m]	Presión [Pa]	Error [%]
Caso 1	2.172	5,0 E-03	17,4876	29,6941
Caso 2	49.997	8,0 E-04	24,6488	10,5940
Caso 3	119.078	5,0 E-04	10,4538	53,0960
Caso 4	312.331	3,0 E-04	23,2169	4,16924
Caso 5	685782	2,0 E-04	21,8954	1,75980
Caso 6	1152280	1,5 E-04	22,2877	-----

Fuente: Elaborado a partir de [18]

## 2.9. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera o límites físicos del dominio computacional se presentan en la Tabla 3.

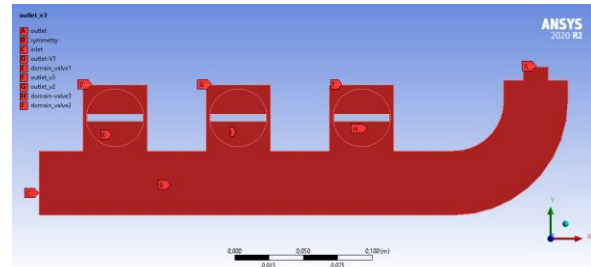
**Tabla 3.** Condiciones de frontera de dominio computacional de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor.

Denominación /variable	Condición de frontera	Unidad
Cuerpo del ariete	<i>symmetry</i>	-

La estimación del error se realiza mediante la ecuación (8) [17]:

$$Error [\%] = 100 \left( \frac{Nua - Nui}{Nui} \right) \quad (8)$$

Donde: *Nua* y *Nui*, son los valores actual e ideal respectivamente. Se toma el mallado del caso 5, considerando que presenta un error menor.



**Figura 6.** Identificación de condiciones de frontera de dominio computacional de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor. Fuente: Elaboración propia.

## 2.10. Parámetros de entrada

Los principales parámetros de entrada para el análisis numérico de la bomba de ariete hidráulico se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Datos de operación de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor

Denominación	Unidad	Valor
Velocidad del flujo ( <i>v</i> )	m/s	2.697
Velocidad angular ( <i>ω</i> )	rad/s	6.28
Caudal volumétrico máx. ( <i>Q</i> )	m <sup>3</sup> /s	5.46 e-3
Caudal másico ( <i>ṁ</i> )	Kg/s	5.46
Tiempo de un ciclo ( <i>T<sub>c</sub></i> )	s	1
Caudal bombeado/ciclo ( <i>Q<sub>b</sub></i> )	m <sup>3</sup>	1.28 e-4
Presión dinámica ( <i>P<sub>D</sub></i> )	Pa	1201.25
Tiempo de cierre válvula ( <i>T<sub>v</sub></i> )	s	0.00313
Presión máxima ( <i>P<sub>max</sub></i> )	Mpa	2
Presión mínima ( <i>P<sub>min</sub></i> )	Mpa	1.96

Fuente: Tomado de [18]

Entrada de flujo (Inlet)	Mass Flow Inlet Turbulent Intensity del 5 % Turbulent Viscosity Ratio de 10	kg/s
Salida de flujo (Outlet)	Mass Flow Outlet	kg/s
Salida de válvulas de impulso	Outlet_v1 Mass Flow Outlet	kg/s
Dominio de válvulas de impulso	Domain valve	-

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6, se muestra la identificación de las condiciones de frontera de las diferentes partes del dominio computacional de la bomba de Ariete. Hidráulico Multipulsor.

Para este tipo de modelamiento CFD se incluye el modelo de turbulencia de dos ecuaciones  $k - \epsilon$  *Realizable* teniendo en cuenta que la aparición de trayectorias circulares no será en gran escala, el solucionador estará basado en presión, considerando que el agua es un fluido incompresible, se establecerá la calidad de los residuales como  $1 \times 10^{-4}$ . Los parámetros y condiciones de frontera establecidas anteriormente complementaran la solución.

### 2.11. Simulación de escenarios.

Para simular numéricamente el flujo de agua en la bomba de ariete, se plantean tres escenarios (ver tabla 5), definidos estos como: *E1* para el análisis con una válvula de impulso, *E2* dos válvulas y *E3* para tres válvulas de impulso. El valor de cero (0) registrado en la tabla indica que la válvula se encuentra bloqueada.

**Tabla 5.** Parametrización de escenarios de simulación

Escenario	válvula 1	válvula 2	válvula 3	Variable de salida
<i>E1</i>	0	0	1	Caudal
<i>E2</i>	0	1	1	Caudal
<i>E3</i>	1	1	1	Caudal

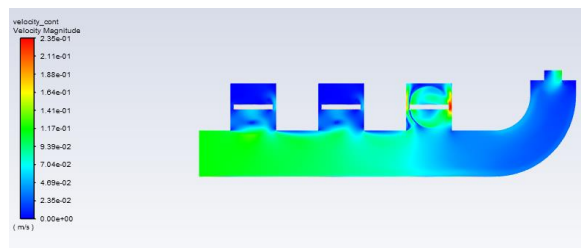
Fuente: Elaboración propia.

### Validación del procedimiento.

La validación del procedimiento se realiza comparando los resultados numéricos obtenidos en las diferentes simulaciones con respecto a los datos experimentales del rendimiento del ariete hidráulico obtenido en [18]. En donde se presenta valores de caudal másico de entrada de  $5.46 \text{ kg/s}$  y de salida de  $1 \text{ kg/s}$ , con un rendimiento de 18.3 %. Estos resultados se obtienen con un peso muerto de  $1400 \text{ g}$  y una carrera de  $3 \text{ mm}$ , tres válvulas de impulso. En estas condiciones el error en el rendimiento global es de 0.23 % con respecto a los valores numéricos que están en el orden del 18,53%.

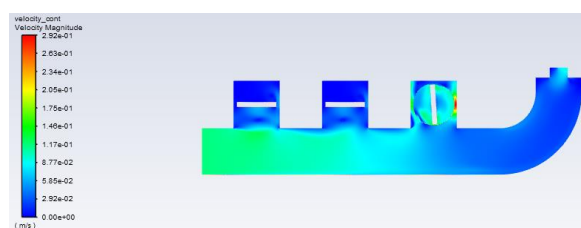
### Simulación de Escenario *E1*

En la Figura 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta los contornos de velocidad con la válvula de impulso en condición cerrada, en donde se observa el avance del flujo después de 1 segundo de integración con las condiciones antes mencionadas.



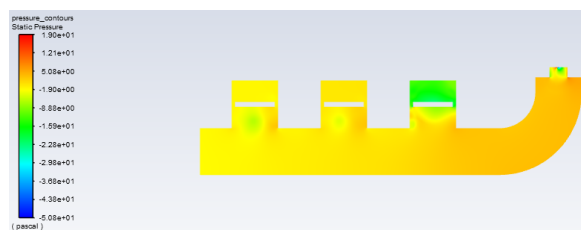
**Figura 7.** Contorno de velocidad-*E1* posición válvulas cerradas. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8, se observa el avance del flujo después de haber transcurrido 2,5 segundos de simulación, con la válvula de impulso en condición abierta. Se aprecia la disminución del flujo al llegar al área de salida, lo que indica que una parte de este fluido se desperdiciara en el momento que la válvula de impulso se abre.

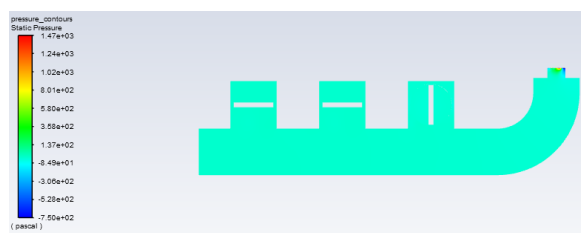


**Figura 8.** Contorno de velocidad, - *E1* posición válvulas abiertas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9, se indica se muestra los contornos de presión con válvula de impulso cerrada, supuesto en el cual la presión en el contorno de salida del ariete es mayor que cuando la válvula de impulso se abre como se puede observar en la Figura 10, el análisis se realiza en un tiempo de simulación de un 1 segundo y 2,5 segundos respectivamente.



**Figura 9.** Contornos de presión *E1* posición válvulas cerradas. Fuente: Elaboración propia

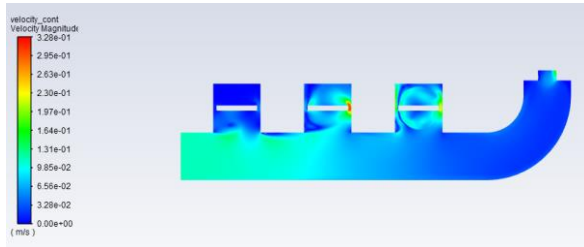


**Figura 10.** Contornos de presión-*E1* posición válvulas abiertas. Fuente: Elaboración propia.



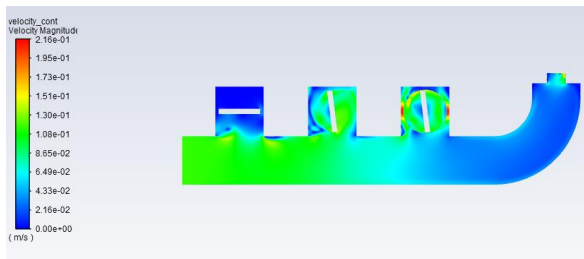
### Simulación de Escenario E2

Al igual que en el escenario E1, se realiza la simulación numérica con dos válvulas de impulso, se considera a la válvula 1 como elemento estático, como se puede observar en la Figura 11.



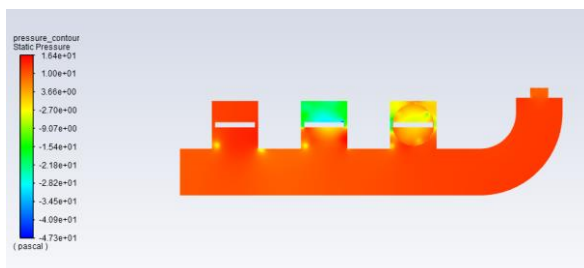
**Figura 3.** Contornos de velocidad-E2 posición válvulas cerradas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12, se muestra los contornos de velocidad en un tiempo de simulación de 2,5 segundos, en donde se observa una variación en la velocidad de salida en el punto de análisis con respecto al supuesto cuando la válvula se cierra.

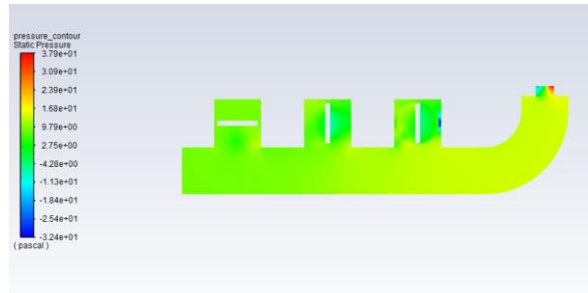


**Figura 4.** Contornos de velocidad-E2 posición válvulas abiertas. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 13, se observa los contornos de presión de la bomba de ariete con dos válvulas de impulso con el supuesto de una válvula cerrada. La presión en este caso aumenta notablemente con respecto a la presión cuando las válvulas de impulso se encuentran abiertas (ver Figura 14). La evaluación se realiza en un tiempo de simulación de 1 y 2,5 segundos respectivamente.



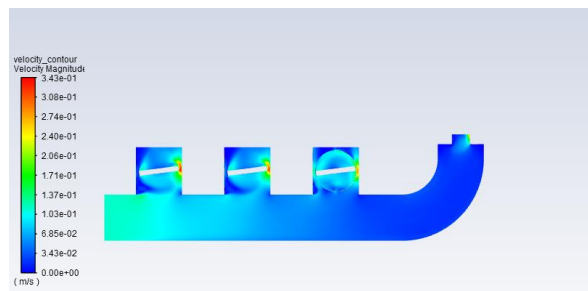
**Figura 5.** Contornos de presión-E2 posición válvulas cerradas. Fuente: Elaboración propia



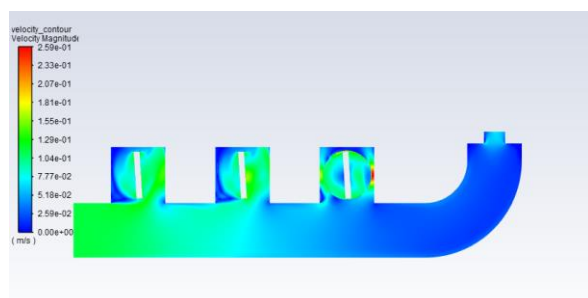
**Figura 6.** Contornos de presión-E2 posición válvulas abiertas. Fuente: Elaboración propia.

### Simulación de Escenario E3

En la Figura 15, se observa la velocidad del flujo mientras las válvulas de impulso se encuentran en el supuesto considerado como cerrado después de haber transcurrido 1 segundo de simulación numérica, mientras que en la Figura 16, se muestra el contorno de velocidad después de haber transcurrido 2,5 segundos de simulación en la válvula abierta.

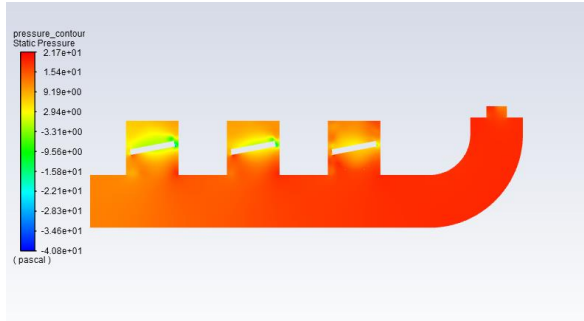


**Figura 15.** Contornos de velocidad-E3 posición válvulas cerradas. Fuente: Elaboración propia.

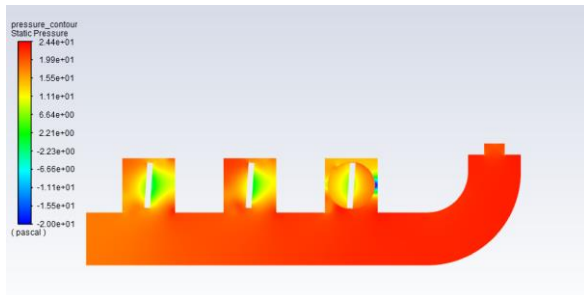


**Figura 7.** Contornos de velocidad-E3 posición válvulas abiertas. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 17 y 18, muestran los contornos de presión estática, primero con el estado de las válvulas de impulso cerradas y en la siguiente figura con válvulas en estado abierto, y tiempo de simulación de 1 y 2,5 segundos respectivamente.



**Figura 17.** Contornos de presión-E3 posición válvulas cerradas. Fuente: Elaboración propia



**Figura 18.** Contornos de presión-E3 posición válvulas abiertas. Fuente: Elaboración propia.

### 3. Análisis de resultados

En este apartado se realiza la comparación de los tres escenarios propuestos, analizando el comportamiento de variables como: velocidad, presión estática, caudal másico y caudal volumétrico, para tiempos establecidos de simulación. Como era de esperar los valores de caudal másico y caudal volumétrico se mantienen constantes con valores de  $0.99 \text{ kg/s}$  y  $0.001001 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por el contrario, la presión aumenta de  $0.327 \text{ Pa}$  hasta  $22.194 \text{ Pa}$ , a medida que se incrementa las válvulas de impulso, como se observa en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados numéricos de escenarios de simulación

Escenario	Caudal másico [kg/s]	Caudal volumétrico [m <sup>3</sup> /s]	Presión Estática [Pa]
E1	1	0.001001	0.327
E2	1	0.001001	10.631
E3	0.999	0.001001	22.194

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7, se presenta los valores de eficiencia de la bomba de ariete, calculados con las ecuaciones 2,

3,4, en donde se observa que con tres válvulas de impulso (E3), la eficiencia alcanza un valor del 24.11 %, valor superior a la de una válvula de impulso (E1).

**Tabla 7.** Resultados calculados de eficiencia en escenarios de simulación

Escenario	Caudal volumétrico de salida [m <sup>3</sup> /s]	Presión de salida [Pa]	Eficiencia [%]
E1	0.001001	0.327	4.355
E2	0.001001	10.631	11.55
E3	0.001001	22.194	24.11

Fuente: Elaboración propia.

### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado simulaciones del flujo de agua en la bomba de ariete hidráulico al adicionar válvulas de impulso, para validar los modelos obtenidos con *Ansys Fluent* en relación con resultados experimentales; obteniéndose una buena coincidencia, tanto en el patrón de comportamiento como en valores obtenidos en los campos de velocidades, presiones y rendimiento. Las principales conclusiones a partir de estos criterios se pueden resumir de la siguiente manera:

La validación del procedimiento aplicado para la simulación, usando datos conocidos de operación de una bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor, permite manejar valores referenciales de porcentaje de error que se podría tener en cuenta al momento de la simulación del caso de estudio; además definir las diferentes restricciones y condiciones de contorno del modelo. En cuanto al rendimiento se han obtenido errores del 0.23 %.

Se logró realizar el estudio de independencia de malla con el objetivo de disminuir el gasto computacional, evidenciando un error de precisión del 1.75 % y así alcanzando obtener un mallado de buena calidad.

El modelo de turbulencia K –épsilon represento en buena medida el efecto del golpe de ariete en la bomba tomada como caso de estudio, llegando a arrojar resultados coherentes en la simulación.

La presión estática de descarga de la bomba de ariete hidráulico aumenta debido al incremento de las válvulas de impulso. Con tres válvulas la presión de descarga alcanza un valor máximo de  $22.19 \text{ Pa}$ .

Los caudales tanto másico como volumétrico no sufren variación significativa a medida que aumenta el número de válvulas de impulso durante la operación del Ariete Hidráulico Multipulsor tomada como caso de estudio.



El rendimiento global de la bomba de ariete hidráulico se incrementa significativamente a medida que entran a operar más válvulas impulso hasta llegar a su máximo con tres válvulas. El incremento va desde un 4.35 % hasta el 24,11 %.

## 5. Referencias

- [1] Lentini, E., Hacia una agenda de seguridad hídrica para América Latina y el Caribe 2030, Caracas: CAF, 2022. Retrieved from <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1881>.
- [2] Bretas, Fernando, et al. "Agua para el futuro: estrategia de seguridad hídrica para América Latina y el Caribe." (2020).
- [3] Urquiza, Anahí, and Marco Billi. "Seguridad hídrica y energética en América Latina y el Caribe: definición y aproximación territorial para el análisis de brechas y riesgos de la población." (2020).
- [4] Cercado Damiany, Walter Alejandro. Gestión gubernamental del uso del agua con fines de riego en Ecuador. BS thesis. BABAHOYO: UTB, 2022, 2022.
- [5] Ávila-González, Enmanuel, et al. "Evolución histórica de las fuentes energéticas empleadas en el abasto de agua y riego agrícolas." *Revista Ingeniería Agrícola* 11.1 (2021): 47-57.
- [6] Li, Jiazhen, et al. "Structural design and parameter optimization on a waste valve for hydraulic ram pumps." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 235.4 (2021): 747-765.
- [7] Zeidan, Mohamad, and Avi Ostfeld. "Hydraulic ram pump integration into water distribution systems for energy recovery application." *Water* 14.1 (2021): 21.
- [8] Rajaonison, Andriamahefasoa, and Hery Tiana Rakotondramiarana. "Experimental validation of a mathematical model of the operation of a hydraulic ram pump with a Springs system." *American Journal of Applied Sciences* 17.1 (2020): 135-140.
- [9] Ahmad, Robiah, et al. "Design and development of a hydraulic ram pump for the rural communities." 2020 IEEE 8th R10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). IEEE, 2020.
- [10] Sarip, S., et al. "Design, analysis and fabrication of UTM hydraulic ram pump for water supply in remote areas." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 17.1 (2020): 213-221.
- [11] S. De las Heras, «Fluidos, Bombas e Instalaciones Hidráulicas». [En línea]. Disponible en: <https://www.libreriaingeniero.com/2020/10/fluidos-bombas-e-instalaciones-hidraulicas-salvador-de-las-heras.html>
- [12] P. Bertinat, J. Chemes, y Micheletti, «Bomba de Ariete Hidráulico». 2012. [En línea]. Disponible en: [https://drive.google.com/file/d/0B8FaYsQx\\_P33RzNPMk4tVk0xSTA/view?pre&usp=embed\\_fac ebook](https://drive.google.com/file/d/0B8FaYsQx_P33RzNPMk4tVk0xSTA/view?pre&usp=embed_fac ebook)
- [13] S. Watt, «A Manual On The Hydraulic Ram For Pumping Water S. B. Watt». Intermediate Technology Publications Ltd., 2018. [En línea]. Disponible en: <https://archive.org/details/AManualOnTheHydraulicRamForPumpingWaterS.B.Watt>
- [14] Vega Frias, Kely. "Comparación de rendimiento de dos bombas de ariete hidráulico multipulsoras en paralelo para el abastecimiento de agua." (2024).
- [15] Reinoso, F.; Jara, N.; Gómez, P.; Nieto, C. (2016). «Caracterización del flujo de aire en colinas para el emplazamiento de parques eólicos». *INGENIUS*. N.º 15, (Enero-Junio). pp. 17-26. ISSN: 1390-650X.
- [16] H. Versteeg y W. Malalasekera, «An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method». 2017.
- [17] Shen, Ruiqing, et al. "Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 67 (2020): 104252.
- [18] Reinoso, Fran, Augusto Bustamante, and Manuel Quezada. "Diseño de un prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor de abastecimiento de agua para irrigación." (2009).