UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO MEDIANTE SIMULACIÓN DEL EFECTO HIDRODINÁMICO DEL NÚMERO DE VÁLVULAS DE IMPULSO EN LAS CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: JORGE VINICIO BRITO TIGRE

TUTOR: ING. FRAN ZHOVANI REINOSO AVECILLAS, MSC.

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Vinicio Brito Tigre con documento de identificación N° 0105121164, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 18 de abril del 2022

Atentamente,

Jorge Vinicio Brito Tigre

0105121164

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Jorge Vinicio Brito Tigre con documento de identificación N° 0105121164, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del Proyecto Técnico: "Estudio mediante simulación del efecto hidrodinámico del número de válvulas de impulso en las características operativas de una bomba de ariete hidráulico", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de abril del 2022

Atentamente,

Jorge Vinicio Brito Tigre

0105121164

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fran Zhovani Reinoso Avecillas con documento de identificación N° 0102257425, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO MEDIANTE SIMULACIÓN DEL EFECTO HIDRODINÁMICO DEL NÚMERO DE VÁLVULAS DE IMPULSO EN LAS CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO, realizado por Jorge Vinicio Brito Tigre con documento de identificación N° 0105121164, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de abril del 2022

Atentamente,

Ing. Fran Zhovani Reinoso Avecillas, MsC.
0102257425

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios y la Virgen María Auxiliadora por iluminarme y brindarme salud y persistencia para poder realizarlo.

A mis padres José y Beatriz por brindarme de su amor, esfuerzo, trabajo y sacrificio en todos estos años, por inculcarme respeto y honestidad, por enseñarme que lo que uno se propone lo puede lograr.

A mis abuelitos allá en el cielo que sé que estarán orgullos de este logro.

A mis hermanos por todo su apoyo, y especial a Marcia y mi cuñado Mauricio quienes fueron pilar fundamental en este proceso de estudio.

A Jessica por haber estado siempre pendiente brindándome su apoyo e incitándome hacer las cosas bien, que a pesar de no estar siempre le estaré muy agradecido.

A todos mis amigos y docentes, por haber formado parte de este proceso tan importante.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica Salesiana en especial a los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica, siendo ellos los encargados de proporcionar los conocimientos necesarios para alcanzar las destrezas y formación profesional.

A mi familia en especial a mis padres por el constante apoyo en este proceso de formación.

El más sincero de mis agradecimientos al Ingeniero. Fran Zhovani Reinoso Avecillas, por la tutela, el apoyo y por el tiempo brindado a lo largo de la resolución de este proyecto de titulación.

ABREVIATURAS

CAD	Diseño asistido por computador (Computer Aided Design)
CFD	Dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics)
RANS	Ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (Reynolds Averaged Navier Stokes)
Re	Número de Reynolds

SIMBOLOGÍA

θ	Angulo de desplazamiento
ρ	Densidad del fluido
D	Diámetro de la tubería
f	Frecuencia
$\dot{m}$	Flujo másico
L	Longitud de la tubería
P	Presión
Q	Caudal total
Qv	Caudal que atraviesa la válvula.
t	Tiempo
v	Velocidad de flujo
ω	Velocidad angular

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 el efecto, se realiza una revisión bibliográfica para determinar las características operativas de una bomba de ariete hidráulico y analizar los modelos numéricos aplicados en el modelamiento numérico del flujo de fluidos. Seguidamente, se procede a definir el modelo físico bidimensional y el dominio computacional de la bomba de ariete hidráulico estableciendo condiciones de contorno para generar el mallado. Utilizando el software Ansys Fluent, 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 la eficiencia del ariete hidráulico aumenta considerablemente, con aproximadamente un incremento del 20 % con respecto a la eficiencia del ariete hidráulico de una sola válvula de impulso.

PALABRAS CLAVE:
Ariete hidráulico, Válvula impulso, Fluent.

ABSTRACT

The purpose of this research is to carry out a simulation study of the hydrodynamic effect of the number of impulse valves on the operating characteristics of a hydraulic ram pump. For this purpose, a literature review is carried out to determine the operating characteristics of a hydraulic ram pump and to analyze the numerical models applied in the numerical modeling of fluid flow. Next, we proceed to define the two-dimensional physical model and the computational domain of the hydraulic ram pump by establishing boundary conditions to generate the mesh. Using Ansys Fluent software, the base case and various scenarios are simulated by increasing the number of impulse valves. Simulation results show that increasing the number of impulse valves increases the efficiency of the hydraulic ram considerably, with approximately a 20% increase in efficiency with respect to the performance of the single impulse valve.

Keywords:

Hydraulic ram, Impulse Valve, Fluent

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN ii

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA iii

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iv

DEDICATORIA v

AGRADECIMIENTOS vi

ABREVIATURAS vii

SIMBOLOGÍA viii

RESUMEN ix

ABSTRACT x

ÍNDICE GENERAL xi

Índice de figuras xv

Índice de tablas xviii

1. Introducción 1

2. La problemática del bombeo de agua. 2

2.1. Problema 2

2.1.1. Antecedentes 2

2.1.2. Definición del problema 6

2.1.3. Delimitación y alcance de la investigación 6

2.1.4. Justificación e importancia 7

2.2. Objetivos de la investigación 7

2.2.1. Objetivo general 7

2.2.2. Objetivos específicos 8

3. Marco teórico. 8
3.1. Ariete hidráulico 8
3.2. Generalidades y campo de aplicación 8
3.2.1. Principio de operación 9
3.2.2. Partes constitutivas del ariete hidráulico 10
3.2.2.1. Tanque de alimentación 10
3.2.2.2. Tubería de alimentación (A) 11
3.2.2.3. Válvula de impulso 11
3.2.2.4. Válvula de retención (B) 14
3.2.2.5. Válvula de aire (C) 14
3.2.2.6. Cámara de aire (D) 15
3.2.2.7. Tubería de entrega (E) 15
3.2.3. Tipos de ariete hidráulico 15
3.2.4. Ariete hidráulico multipulsor 16
3.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD). 17
3.3.1. Herramienta 17
3.3.1.1. Pre-procesamiento 18
3.3.1.2. Procesamiento 18
3.3.1.3. Post- procesamiento 19
3.4. Modelos numéricos para el análisis del flujo de fluidos 19
3.4.1. Modelo de pronóstico 19
3.4.2. Modelo de flujo hidrostático 19
3.4.3. Modelo de turbulencia 20
3.4.4. Modelo de RANS 21
4. Marco metodológico 21

4.1. Software utilizado 21
4.2. Características y consideraciones de los elementos a simular 22
4.2.1. Identificación de variables 22
4.3. Modelado del problema 23
4.3.1. Pre-procesamiento. 24
4.3.1.1. Generación del modelo físico 26
4.3.1.2. Generación del mallado 27
4.3.1.3. Condiciones de frontera. 35
4.3.1.4. Determinación de Parámetros de entrada 36
4.3.1.5. Escenarios de simulación. 37
4.3.2. Procesamiento 37
4.3.2.1. Simulación numérica (set up) 38
5. Resultados 40
5.1. Validación del procedimiento 40
5.2. Simulación de escenario *E1* (1 válvula de impulso) 41
5.3. Simulación de escenario *E2* (2 válvulas de impulso) 46
5.4. Simulación de escenario *E3* (3 válvulas de impulso) 50
5.5. Análisis de resultados de los escenarios de simulación. 54
5.6. Eficiencia de la bomba de ariete 55
6. Conclusiones 58
7. Recomendaciones 60
8. Trabajo futuro 61
9. Referencias 62
10. Anexos 66
10.1. Anexo 1. Características de la calidad de la malla 66

10.2. Anexo 2. Características del método de solución. 67

10.3. Anexo 3. Características del reporte de simulación. 68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2-1. Esquema de bomba de ariete hidráulico 9

Figura 2.2-2. Esquema de instalación con bomba de ariete hidráulico. 10

Figura 2.2-3. Válvula de impulso con resorte de pletina. 11

Figura 2.2-4. Válvula de impulso de plato perforado. 12

Figura 2.2-5. Válvula regulada con resorte. 13

Figura 2.2-6. Válvula con pesas por debajo. 13

Figura 2.2-7. Válvula con pesas por encima. 14

Figura 2.2-8. Ariete hidráulico de caudal fijo 15

Figura 2.2-9. Ariete hidráulico multiválvulas de caudal variable. 16

Figura 3.3-1. Modelo físico del caso de estudio. 24

Figura 3.3-2. Dominio computacional de bomba de Ariete Hidráulico - caso de estudio. 25

Figura 3.3-3. Dominio computacional 2D bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor. 26

Figura 3.3-4. Malla de dominio computacional de bomba ariete hidráulico. 27

Figura 3.3-5: Identificación de superficies del dominio computacional de bomba de ariete hidráulico. 28

Figura 3.3-6. Identificación de mallado particular de cada elemento 29

Figura 3.3-7: Identificación de características de región de contacto válvula 1 29

Figura 3.3-8. Resultados del proceso de independencia de malla. 32

Figura 3.3-9: Reporte de calidad de elementos de malla. 33

Figura 3.3-10: Reporte de Calidad Ortogonal. 34

Figura 3.3-11: Reporte de Características de Oblicuidad. 35

Figura 3.3-12: Características del proceso de ejecución. 39

Figura 4.2-1. Contornos de salida. 41

Figura 4.2-2. Contorno de velocidad – E1 posición válvula cerrada. 42

Figura 4.2-3. Contorno de velocidad - E1 posición válvula abierta. 42

Figura 4.2-4. Contorno de presión - E1 posición válvula cerrada. 43

Figura 4.2-5. Contorno de presión - E1 posición válvula abierta. 43

Figura 4.2-6. Reporte de convergencia de caudal másico. 44

Figura 4.2-7. Reporte de caudal másico 44

Figura 4.2-8. Reporte de caudal volumétrico. 45

Figura 4.2-9. Reporte de presión. 45

Figura 4.3-1. Contorno de velocidad, - E2 posición válvulas cerradas 46

Figura 4.3-2. Contorno de velocidad, - E2 posición válvulas abiertas. 47

Figura 4.3-3. Contorno de presión, - E2 posición válvulas cerradas. 47

Figura 4.3-4. Contorno de presión, - E2 posición válvulas abiertas. 48

Figura 4.3-5. Reporte de convergencia de caudal másico. 48

Figura 4.3-6. Reporte de caudal másico. 49

Figura 4.3-7. Reporte de caudal volumétrico. 49

Figura 4.3-8. Reporte de presión estática. 50

Figura 4.4-1: Contorno de velocidad, - E3 posición válvulas cerradas. 50

Figura 4.4-2: Contorno de velocidad, - E3 posición válvulas abiertas. 51

Figura 4.4-3: Contorno de presión, - E3 posición válvulas cerradas. 51

Figura 4.4-4: Contorno de presión, - E3 posición válvulas abiertas. 52

Figura 4.4-5. Reporte de convergencia de caudal másico. 52

Figura 4.4-6: Reporte de caudal másico. 53

Figura 4.4-7. Reporte de caudal volumétrico 53

Figura 4.4-8. Reporte de presión. 54

Figura 4.6-1. Eficiencia del ariete hidráulico multipulsor para escenarios E1, E2 y E3 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.2-1. Datos de operación de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor 23

Tabla 4.3-1 . Dimensiones principales del ariete hidráulico. 26

Tabla 4.3-2. Error de discretización. 31

Tabla 4.3-3. Parámetros de análisis 37

Tabla 4.3-4: Parametrización de escenarios de simulación 37

Tabla 5.5-1. Datos obtenidos del proceso de simulación de escenarios. 54

Tabla 5.6-1. Porcentajes de eficiencia del ariete hidráulico multipulsor. 56

1. Introducción

El estudio se enmarca en el ámbito de la simulación computacional del flujo de agua a través de una bomba de ariete hidráulico, con la finalidad de estudiar las características operativas de la bomba y disponer de elementos de juicio para proponer alternativas para mejorar su desempeño. Esta investigación se lleva a cabo con el objeto de estudiar mediante simulación numérica el desempeño del ariete hidráulico debido al incremento del número de válvulas de impulso, enfocándose en el estudio mediante simulación numérica CFD. Resolviendo para este análisis el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ de las ecuaciones de Navier-Stokes. Tratando de esta manera esclarecer la importancia que tiene una válvula de impulso en un sistema de ariete hidráulico, siendo esta la encargada de mejorar la eficiencia y por ende el rendimiento de esta máquina.

En este proyecto se aplicarán diferentes tipos de metodologías de investigación divididas en diferentes etapas. La metodología utilizada comprende cuatro fases de trabajo: Fase I. Investigación del tipo documental, Fase II. Investigación del tipo exploratorio con el fin de estudiar los modelos numéricos, Fase III. Simulación, Fase IV. Resultados.

El trabajo se encuentra dividida en cuatro capítulos. El primero comprende la parte introductoria con respecto al avance tecnológico y el principio de operación de la bomba de ariete, en el capítulo segundo, se procede a describir la situación física y el estudio de los modelos numéricos para el análisis competente, el capítulo tres abarca las características y consideraciones de los elementos a considerar en el análisis, como también el modelado del problema de estudio, realizando a su vez un estudio de independencia de malla, a continuación en el cuarto y último capítulo se procede hacer simulaciones bidimensionales de los escenarios de estudio planteados y se procede analizar los resultados obtenidos para cada caso de estudio.

2. La problemática del bombeo de agua.

2.1. Problema

En este apartado se plantea la problemática que se intenta resolver con el desarrollo del proyecto de investigación, estableciendo en primera instancia los antecedentes e indicando los conocimientos o avances tecnológicos de mayor relevancia que se han desarrollado en los últimos años, teniendo claro lo anterior se definirá el problema y consiguiente a esto se establecerá delimitaciones y alcance de la investigación terminando con la justificación e importancia del proyecto.

2.1.1. Antecedentes

Teniendo en cuenta que el agua es una fuente de vida indispensable para los seres vivos. Para el transporte de agua de un lugar a otro mediante tuberías se han desarrollado diferentes sistemas de bombeo, mediante bombas que utilizan para su funcionamiento consumibles energéticos, como también está el sistema de bombeo no convencional conocido como bomba de ariete hidráulico, esta última fue inventada hace más de 200 años por el inglés John Whitehurst desarrollando un equipo capaz de aprovechar el golpe de ariete, siendo está perfeccionado años más tarde por el francés Joseph Montgolfier posterior a esto existen varios modelos en diferentes países a pesar de no ser este un sistema muy utilizado hoy en día, pero si tenemos en cuenta desde la parte económica y garantizando un caudal de alimentación constante la bomba de ariete hidráulico es muy beneficioso para elevar agua a alturas considerables. Reza, Babak, & Alireza, (2015)

La automatización y control de las redes colectivas de riego y los sistemas de riego a presión han evolucionado notablemente en la última década, pasando de la necesidad de convertir en acciones automáticas lo que se hacía manualmente a requerir, actualmente, herramientas que permitan la gestión integral y eficiente de todas las tareas relacionadas con la distribución de agua para riego.(Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010)

Hoy en día la humanidad ha desarrollado múltiples técnicas para el transporte del líquido vital a través de canales y tuberías siempre y cuando la fuente que alimenta este sistema esté en un nivel más alto al que se prevé llegar. Cuando los niveles no son favorables para transportar agua por gravedad es cuando se presenta la necesidad de un sistema de bombeo los cuales en su mayoría operan con combustibles fósiles o energía eléctrica, por lo que se hacen costosos en su operación y mantenimiento, aparte de tener un alto valor adquisitivo; todo esto hace que la

población de las zonas rurales más pobres no tengan acceso a estos sistemas, generando que los pobladores tengan que transportar el agua manualmente desde las fuentes de abastecimiento hasta sus viviendas o terrenos de cultivo. (Mataix, 2004).

Dentro de los sistemas de suministro y abastecimiento de agua está catalogada también el sistema de bombeo no convencional, conocido como la bomba de ariete hidráulico, para la cual, desde hace varios años las investigaciones están basadas en el mejoramiento del diseño mecánico y el principio de operación, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema. Llegando analizar desde diferentes puntos de vista parámetros tales como: la altura de elevación, obtención de mayor eficiencia en el caudal de salida, y puestas en marcha de diferentes tipos de bombas de arietes hidráulicos.

Los sistemas de bombeo de tipo ariete hidráulico mantienen eficiencias relativamente bajas, por sus características de diseño y fabricación de índole artesanal. Las bajas eficiencias del ariete hidráulico dependen mucho de sus parámetros de funcionamiento, teniendo un caudal constante de entrada principalmente depende de la válvula de impulso, pudiendo esta ser sustituida por más de una instalada en serie, pero con las mismas especificaciones.

Con el fin de indagar en el tema y adquirir suficiente información para el desarrollo de este proyecto de investigación se hace el siguiente análisis de estudios e investigaciones realizados con anterioridad.

Los autores Reinoso, Bustamante, & Quezada, (2009) Contribuyeron con la investigación "Diseño de un prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor de abastecimiento de agua para irrigación" en el trabajo analizan los factores principales que mueven el equipo de bombeo, del cual obtienen como resultado que la presión máxima, con caudal cero, del ariete multi-impulsión en condiciones convencionales, es decir, con solo una válvula de impulsión, es de 4,2 bar o 42 m, en relación con la presión que obtienen con 2 válvulas que es de 12,3 bar o 123 m y para 3 válvulas una presión máxima de 13,5 bar o 135 m, indicando que existe una clara mejora en la sobrepresión, con la adición de válvulas en serie, es decir con una mejora en el diseño mecánico.

Como proyecto multidisciplinario de colaboradores y estudiantes de la Universidad Nacional de Misiones (U.Na.M.) Oberá Misiones – Argentina, los autores Barney, Kerkhoff, Corrado, & Barbaro, (2011) presentan el proyecto "Bomba de ariete. Manejar recursos hídricos de misiones con tecnología adecuada", en el cual logran como resultado un nuevo diseño troncocónico de la válvula de ariete favoreciendo a un buen funcionamiento y lograron alcanzar

un rendimiento del 60 %. Teniendo como propósito fundamental aprovechar las capacidades de una tecnología en desuso.

Del mismo modo, los autores Jara-Cobos, Campoverde-Ochoa, & Pizarro-Jara, (2011), presentan el artículo Emplazamiento, implementación, pruebas de funcionamiento y propuestas de mejora de los sistemas de bombeo mediante rueda hidráulica y ariete multipulsor para el abastecimiento de agua para irrigación en la localidad del campus Juan Lunardi-Yumacay-Paute -Azuay" cuyo objetivo principal fue la implementación de las bombas, específicamente para la irrigación, para validar el trabajo realizan pruebas de campo obteniendo como resultado para el ariete hidráulico como límites de funcionamiento una altura máxima de bombeo de 70 metros con un caudal de 0,2 l/min y un caudal máximo de 4 l/min a una altura de 42 metros. A su vez proponen mejoras para aprovechar de mejor manera el rendimiento de las máquinas.

El autor Acitores-Martínez, (2012) en la Universidad Carlos III de Madrid desarrolla el proyecto de fin de carrera titulado como "Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete". En el que explica el modelo teórico que utilizo para simular el comportamiento de la bomba de ariete, este comportamiento analiza para diferentes casos de estudio en un banco de ensayos, para los cuales el autor afirma haber conseguido un rendimiento máximo del 42.1%, y si se agrandara las alturas de trabajo se podría obtener rendimientos en torno al 60 %.

El autor Amari, (2013) presenta el trabajo de tesis titulada como "Diseño y construcción de un ariete de doble bombeo, para el centro de investigaciones de energías renovables y eficiencia energética", ubicada en las instalaciones de la Universidad Nacional de Loja. En el documento el autor analiza el principio de funcionamiento del ariete de doble bombeo, centrándose en el estudio de la sobrepresión en el conducto de impulsión. Como conclusión relevante el autor afirma que el ariete de doble bombeo tiene la capacidad de bombeo de 27,36 m3 por día desde el nivel de extracción hasta una altura de 20 m, con una eficiencia del 23%.

El trabajo de investigación publicado en la Revista Internacional de Investigación en Ingeniería Mecánica y Robótica (IJMERR) por Sheikh, Handa, & Ninawe, (2013), titulado como "metodología de diseño para bomba de ariete hidráulico (hydram)". Los autores analizan el ciclo de funcionamiento de la bomba de ariete en cuatro secuencias, de las cuales describen el progreso o desarrollo de cada una de ellas.

El autor Galarza, (2013), realizo la investigación "Estudio de factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia" en el que indica que el trabajo se basó en la

modificación del diseño mecánico del Ariete Hidráulico convencional por un ariete multimpulsor, obteniendo la configuración idónea de la válvula de impulsión mejorando su eficiencia, por lo que diseñaron un sistema de válvulas colocadas en serie (ariete multimpulsor), afirmando que el ariete de tres impulsores es el más eficiente con respecto al ariete convencional.

De igual manera, Rivadeneira-Carlosama & Silva-Espinosa, (2013), en su proyecto de titulación "Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento" en el cual analizan los fenómenos dados en las bombas de ariete con el fin de desarrollar un instructivo que ayudado por un software de dimensionamiento facilite la implementación de este sistema, los autores aseguran que la sobrepresión teórica es diferente a la existente en condiciones de funcionamiento de la bomba de ariete, ya que, esta permite disminuir dicha presión por la configuración de sus válvulas, por esta razón la sobrepresión real es menor que la calculada, determinando experimentalmente que la bomba de ariete es capaz de elevar de 4 a 5 veces su altura de suministro.

Los autores Guerrero & Gutiérrez, (2014) formando parte de la Universidad Politécnica de Madrid, con el fin de evitar el continuo trabajo de acarreo de agua por parte de niños y mujeres desarrollan el proyecto titulado, "El ariete hidráulico. Proyecto e instalación en Ntongui (Angola)" donde describen el funcionamiento y las consideraciones necesarias que se deben tener al momento de elegir una bomba de ariete, tomando está como una de las diferentes alternativas para el mejoramiento de la eficiencia de los sistemas de impulsión de agua, explican también que se pueden instalar al menos tres arietes en serie con el fin de aprovechar el agua derramada por la válvula de impulso del ariete anterior, teniendo en cuenta que a medida que la serie vaya avanzando el tamaño del ariete tendría que ir disminuyendo para mejor aprovechamiento. En este proyecto, el cual desarrollaron satisfactoriamente, utilizaron una bomba de ariete hidráulico comercial de la marca Walton, modelo W7, capaz de suministrar hasta 42.000 l/día, para complementar la instalación, utilizaron tubería de acero galvanizado en el tramo de impulso del agua.

Los autores Pilco-Mora & Sandoval-Fernández, (2017) exponiendo el proyecto de titulación "Análisis para el incremento de la capacidad de una bomba de ariete hasta una altura de 50 metros". Los autores indican que, de acuerdo a los métodos analizados, la altura de descarga alcanzada es 50 metros, al obtener un caudal de suministro de 314.1 litros por minuto y un caudal de entrega de 15 litros por minuto, concluyendo que el incremento de la altura de

entrega conlleva a la disminución del flujo de entrega, obteniendo valores de sobrepresión entre 250 y 200 PSI permitiendo al equipo alcanzar su máxima capacidad de bombeo.

Los autores Bakri, Effendy, Huzni, Ismail, Januddi, & Mohammad, (2018), desarrollan el trabajo de investigación titulada como "Desarrollo y prueba de la bomba de ariete hidráulico (Hydram): Experimentos y simulaciones", realizando una evaluación experimental de la válvula de desagüe ajustable y una simulación computacional de la válvula de descarga ajustable; los parámetros establecidos por los autores para realizar el trabajo fueron la longitud del tubo de conducción y el altura de entrega de la descarga, con el fin de obtener más caudal en la descarga de agua variaron la longitud de la carrera de la válvula. Determinando que la longitud óptima de la carrera de la válvula es de 13 mm, que puede descargar 1,2 L/min de agua a una altura de 2 m.

Los autores Fernandez Chavez & Salas Rimarachin (2018) realizan el trabajo de investigación "Diseño del sistema de abastecimiento de agua utilizando la bomba de ariete en la localidad Limabamba, Soritor, Moyobamba, 2018". En el cual analizan un diseño de sistema de abastecimiento de agua para esta localidad logrando identificar las condiciones topográficas para el desarrollo de los cálculos necesarios para el diseño y de esta manera alcanzando así abastecer a la población, para garantizar que el agua sea apta para el consumo se realizaron estudios de calidad de la misma.

2.1.2. Definición del problema

En función de la problemática establecida en el apartado anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿Es posible realizar el análisis mediante simulación del efecto del número de válvulas de impulso en las características de operación de la bomba de ariete hidráulico?*

2.1.3. Delimitación y alcance de la investigación

El presente estudio explorará los complementos de una bomba de ariete hidráulico, empleándose en el área de la simulación, indagando básicamente en la válvula de impulso para analizar el predominio de esta en el sistema.

La investigación abarca únicamente la parte analítica del modelamiento matemático y simulación del sistema, con la variación del número de válvulas de impulso realizando en esta un análisis comparativo de su rendimiento y funcionamiento. Una vez se haya culminado con el proceso de simulación se procederá a realizar la interpretación de resultados obtenidos.

2.1.4. Justificación e importancia

Ante la carestía de recursos económicos, la población agraria se siente limitada al no poseer un sistema de bombeo convencional para el abastecimiento de agua en sus cultivos debido a lo cual se considera que es necesario optar por un sistema de ariete hidráulico. La utilización de un ariete hidráulico, contribuye con cero en contaminación al medio ambiente debido a que para su funcionamiento no utiliza ningún tipo de combustible ni energía eléctrica, además que el costo de implementación es muy bajo, al igual que el costo de mantenimiento es casi nulo, además que, el agua que se desaprovecha en el ciclo de funcionamiento se puede reutilizar aprovechando así al máximo los recursos hídricos

El motivo principal de este trabajo es aportar con un análisis de simulación matemática del rendimiento del ariete hidráulico al incrementar el número de válvulas de impulso, teniendo en cuenta que según el estudio de la técnica realizado no se encontró un aporte relacionado para este tipo de ariete hidráulico.

Las válvulas de impulso de un ariete hidráulico son la parte principal para el aprovechamiento y rendimiento de este tipo de máquina, de estas dependerá el buen desempeño del mismo, por ende, es necesario analizar y optimizar los factores que puedan favorecer a un mejor desempeño.

Realizando este trabajo se podrá proponer algún tipo de mejora en el desempeño de un ariete hidráulico, ya que muchas de estas bombas que son construidas artesanalmente no cuentan con estudios de campo o simplemente no alcanzan los fines por los que se implementaron, para que este tipo de ariete hidráulico sea considerado como una buena implementación debe bombear agua a una altura determinada por un usuario con la mejor eficiencia posible.

2.2. Objetivos de la investigación

2.2.1. Objetivo general

- Estudiar mediante simulación el efecto del número de válvulas de impulso en la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico.

2.2.2. Objetivos específicos

- Revisar el estado de la técnica del principio de operación de la bomba de ariete hidráulico.
- Estudiar los modelos numéricos para simulación del flujo.
- Simular numéricamente la bomba de ariete hidráulico mediante el uso de software especializado de ingeniería.
- Analizar y validar los resultados de la simulación del sistema de ariete hidráulico

3. Marco teórico.

3.1. Ariete hidráulico

La bomba de golpe de ariete o 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 deposito o caudal), 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. El equipo bombea un flujo continuo y funciona interrumpidamente sin necesidad de otra fuente de energía. El ariete hidráulico también puede compararse con un transformador eléctrico, ya que, este recibe una tensión baja (en voltios) con una corriente eléctrica relativamente alta (amperios) y obtiene un régimen de mayor tensión y menor amperaje, en el caso del ariete ocurre un proceso similar a nivel hidráulico: recibe un gran caudal con una baja carga y obtiene un régimen de mayor presión con un menor caudal (Montecinos & Gallardo, 2019).

3.2. Generalidades y campo de aplicación

En zonas rurales y pequeños pueblos el problema de abastecimiento de agua para el consumo humano, e incluso para el riego hoy en día son catalogados como falencias por el poco abastecimiento de estas en ciertas épocas del año. La población de las zonas rurales, para su abastecimiento en tiempos de sequía transportan el agua en cántaros, desde lugares lejanos ya sea de ríos, riachuelos o quebradas, haciendo esto parte de su trabajo cotidiano para sobrevivir.

La captación de cuerpos de aguas superficiales como ríos, riachuelos, lagos y embalses son estructuras que sirven para captar agua y suministrarla de forma continua a una comunidad. El sistema puede hacerse tanto por gravedad, cuando la fuente escogida se encuentra por encima del lugar o a una altitud mayor que el punto de aprovechamiento del agua,

como por bombeo, cuando la fuente se encuentre por debajo del nivel donde se encuentran los usuarios (Lampoglia, Agüero Pittman, Barrios, & Torres, 2014)

3.2.1. Principio de operación

La bomba de ariete Figura 3.2-1 es un modelo de bomba 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 calderín (c). La bomba incorpora, además, sendas válvulas de descarga o desagüe (vd) y de retención (vr), cuya dinámica de apertura y cierre, regulación y tarado han de estar en sintonía con la presión y con el caudal deseados. El principio de funcionamiento alternativo de esta bomba garantiza un pequeño caudal ecológico y una presión suficiente para una vivienda de montaña sin requerir un gran mantenimiento. Es necesario, no obstante, que la bomba pueda acceder a una corriente libre de agua, con un desnivel del orden de un metro, que pueda hacerse fluir por su interior. El golpe de ariete se provoca cuando esta corriente alcanza un valor preestablecido (y regulable) por la válvula de desagüe cerrándola. La sobrepresión consiguiente abre la válvula de retención y da paso al fluido al interior del calderín. Al entrar el golpe en la fase de depresión, la válvula de retención se cierra y aísla 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 calderín sea pulsante y se utilicen depósitos de aforo para acumular el caudal y evitar este inconveniente, si se cree adecuado (De las Heras, 2011).

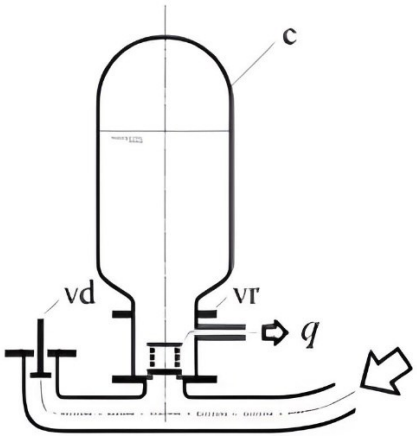


Figura 3.2-1. Esquema de bomba de ariete hidráulico

Fuente*:* De las Heras, 2011

3.2.2. Partes constitutivas del ariete hidráulico

El cuerpo del Ariete es estructuralmente simple, constituido por una caja de válvulas la cual puede estar formada por una te y un codo, una unidad ensamblada cuyos elementos pueden estar unidos por pernos, tornillos, elementos roscados o mediante soldadura según los recursos, tecnificación y complejidad para la misma. Es la parte donde se produce la propagación de la onda de presión, donde se ubican la válvula de impulso y la válvula de entrega (Watt, 1975).

La bomba de ariete hidráulico está compuesta de un esquema simple. En la Figura 3.2-2 se puede observar los elementos básicos complementarios.

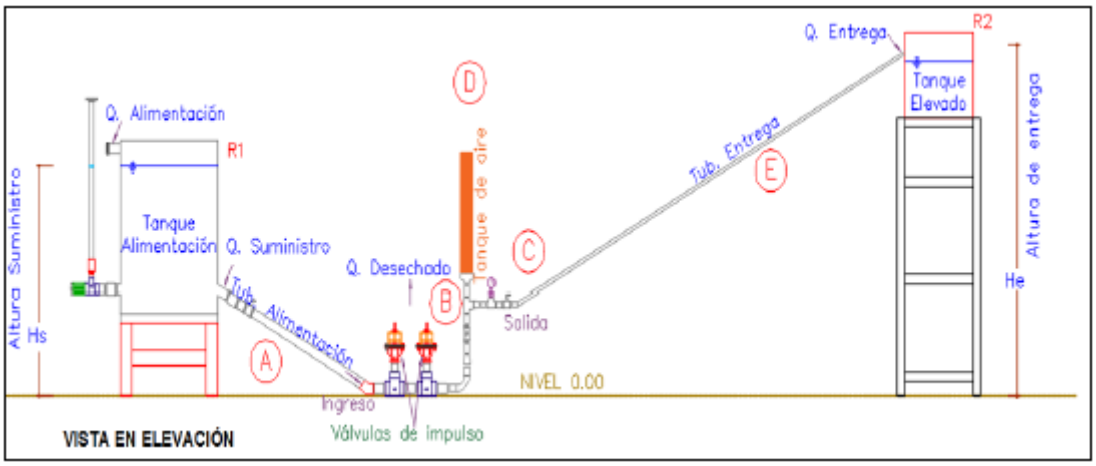


Figura 3.2-2. Esquema de instalación con bomba de ariete hidráulico.

Fuente: Malca-Abanto & Quiroz-Gamboa, 2016.

A continuación, se hace una descripción de los elementos esenciales de la bomba de ariete hidráulico basándose en el esquema de instalación con bomba de ariete hidráulico.

3.2.2.1. Tanque de alimentación

Se puede tratar de un depósito de agua el cual debería garantiza un caudal (Q) de alimentación, este podría estar alimentado de ríos, riachuelos, arroyos, u otra fuente teniendo presente que las características de diseño y construcción serán dependiendo si el agua a bombear es para consumo humano, consumo animal o alguna otra utilidad. Este debería estar situado a un nivel por encima al que se encuentre la bomba de ariete.

3.2.2.2. Tubería de alimentación (A)

Es el elemento encargado de conducir el agua desde el tanque de alimentación hacia la válvula de impulso. Esta debería ser un elemento rígido capaz de soportar el choque hidráulico y aprovechar eficientemente el salto de agua.

3.2.2.3. Válvula de impulso

Esta válvula constituye la parte móvil más importante y determinante en el funcionamiento del equipo. Es la encargada de producir el golpe de ariete debido al cierre brusco que se produce por el efecto del incremento de la velocidad del agua, la correcta selección y buen diseño de esta, garantizara la máxima eficiencia en el funcionamiento del dispositivo (IDRC, 1986).

Sabiendo que las válvulas de impulso es una de las partes fundamentales del ariete hidráulico, y siendo este el complemento en el que se va a trabajar, hacemos énfasis en describir a continuación algunas de ellas:

3.2.2.3.1. Válvula con resorte de pletina

La válvula de platina es netamente artesanal consta de materiales de fácil adquisición como son tubos, planchas, platinas y pernos. Es de fácil construcción y se la puede fabricar en cualquier taller mecánico con un mínimo de herramientas (Watt, 1975).

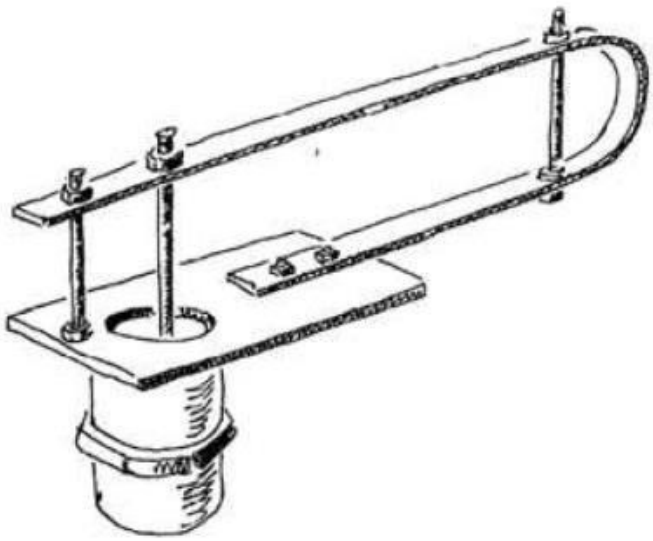


Figura 3.2-3. Válvula de impulso con resorte de pletina.

Fuente: Watt, 1975.

3.2.2.3.2. Válvula con plato perforado

Esta válvula posee un plato perforado de geometría variable y compleja junto a un material que tiene una gran flexibilidad, resistencia al desgaste y alta tolerancia a la fatiga. Material con estas características es a la vez costoso y poco accesible en los países en desarrollo, su construcción es complicada y su vida útil es muy corta. (IDRC, 1986).

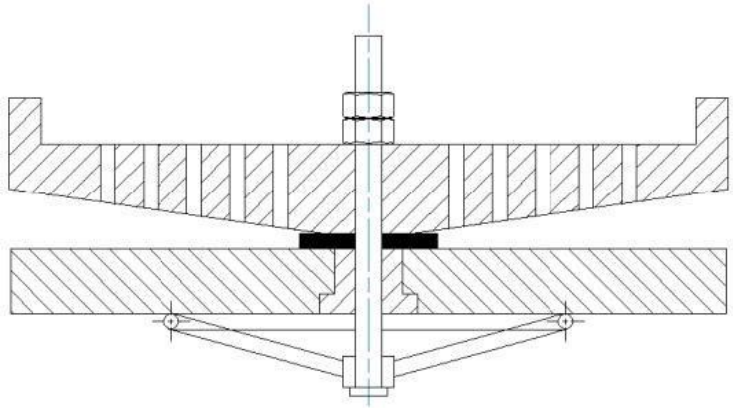


Figura 3.2-4. Válvula de impulso de plato perforado.

Fuente: IDRC, 1986.

3.2.2.3.3. Válvula regulada con resorte

Este diseño implica cálculos previos muy precisos y construcción de elementos exactos. El desplazamiento de la carrera de la válvula lo gobierna un resorte, la válvula puede estar dispuesta en forma vertical u horizontal (IDRC, 1986).

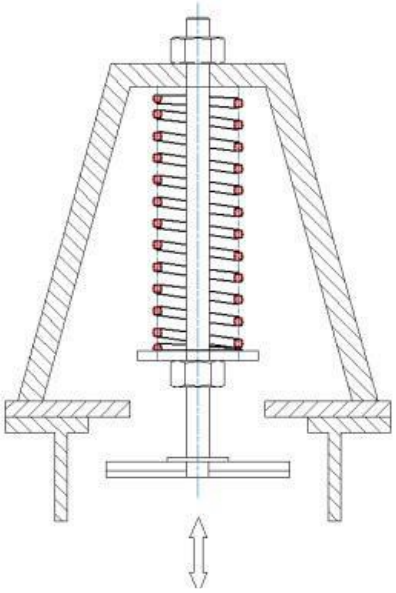


Figura 3.2-5. Válvula regulada con resorte.

Fuente. IDRC, 1986.

3.2.2.3.4. Válvula con pesas por debajo

Como indica Malca-Abanto & Quiroz-Gamboa, (2016) describe que esta válvula posee un diseño robusto, su configuración es sólida, las pesas se ubican en la parte inferior de la tapa de la válvula, tiene la capacidad de variar su carrera y velocidad, con la modificación de su conjunto de pesas. De igual manera, debe ser posicionada en forma vertical.

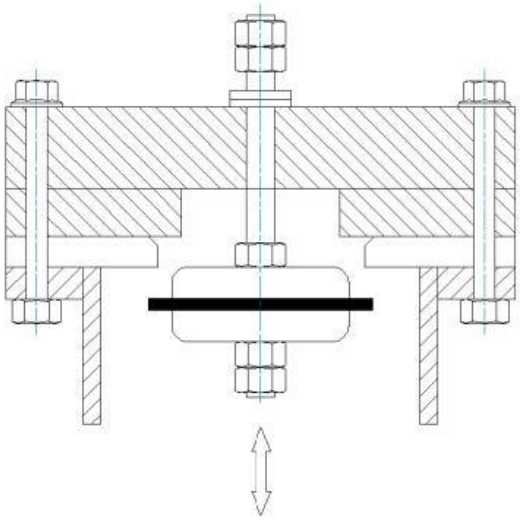


Figura 3.2-6. Válvula con pesas por debajo.

Fuente: Vita, 1990.

3.2.2.3.5. Válvula con pesas por encima

Este diseño tiene la ventaja de poder ajustar su carrera y su velocidad de cierre con la modificación de su conjunto de pesas, su construcción es robusta lo que garantiza una gran durabilidad para un ciclo de vida elevado. Como desventaja se tiene que este tipo de válvulas solo pueden trabajar en forma vertical para que las pesas actúen por la gravedad (IDRC, 1986).

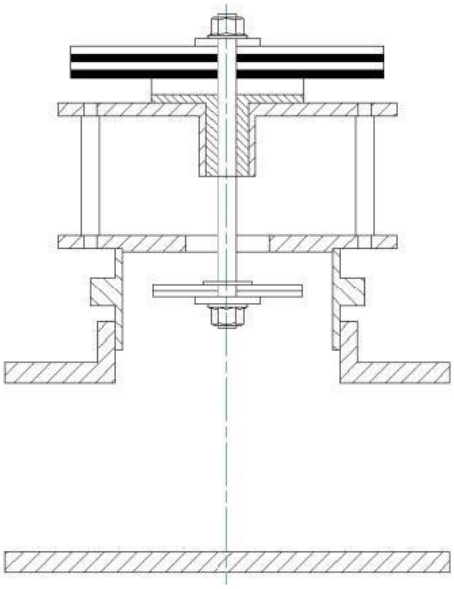


Figura 3.2-7. Válvula con pesas por encima.

Fuente: IDRC, 1986.

3.2.2.4. Válvula de retención (B)

Válvula de tipo check, localizada al ingreso de la cámara de aire, cuya apertura origina el paso de una parte del gasto de alimentación hacia la cámara de aire y cuyo cierre evita el flujo en sentido opuesto (Quispe, 2016).

3.2.2.5. Válvula de aire (C)

Un pequeño orificio ubicado en la zona de la válvula, permite ingresar y restituir lentamente el aire que se pierde al mezclarse con el agua y salir junto con ella a través de la tubería de descarga (Quispe, 2016)

3.2.2.6. Cámara de aire (D)

Ubicada inmediatamente por encima de la válvula de retención, el aire comprimido que en ella se confía, permite el ascenso del agua a través de la tubería de descarga, al actuar en forma similar a la de un resorte (Quispe, 2016).

3.2.2.7. Tubería de entrega (E)

Conducto que transporta el agua desde la cámara de aire hasta el reservorio de almacenamiento o sistema de distribución. No necesariamente esta línea de conducción tiene que ser rígida (Quispe, 2016).

3.2.3. Tipos de ariete hidráulico

A pesar de ser un sistema de bombeo muy sencillo, hasta la actualidad se han realizado muchos trabajos de investigación basados en el diseño principal así realizando prototipos de arietes hidráulicos, en todas las adaptaciones y modificaciones que se han realizado se ha mantenido el principio de funcionamiento básico.

Figura 3.2-8. Ariete hidráulico de caudal fijo

Fuente: https://sites.google.com/site/arieteshidraulicosjcp/tipos-de-arietes

Figura 3.2-9. Ariete hidráulico multiválvulas de caudal variable.

Fuente: https://sites.google.com/site/arieteshidraulicosjcp/tipos-de-arietes

3.2.4. Ariete hidráulico multipulsor

Desde el siglo XIX hasta la actualidad, el desarrollo del ariete hidráulico ha ido en dos direcciones: el mejoramiento del diseño mecánico y la teoría del principio de operación.

El ariete hidráulico multipulsor consiste en un desarrollo en la parte de diseño mecánico, específicamente en la sustitución de la única válvula de impulsión del ariete convencional por un sistema de válvulas colocadas en serie, para aprovechar así el caudal disponible y la energía remanente que normalmente se desperdicia en un ariete convencional, y teniendo así una mejora en el rendimiento (Bertinat, Chemes, & Micheletti, 2012).

El principio de funcionamiento del ariete hidráulico multipulsor es el mismo que el de un ariete convencional. Haciendo un análisis del ariete hidráulico multipulsor, el flujo volumétrico que está distribuido entre las válvulas con la condición que estas sean las mismas:

$$Qv1 = Qv2 = Qv3 \tag{1}$$

Donde:

Qv : Caudal que atraviesa por las válvulas.

Al ubicar las válvulas de manera que la una esté a continuación de la otra, se obtiene el mismo efecto que se obtendría si el ariete fuera un ariete convencional, pero con una ganancia muy importante, que ahora no solo se va a levantar solo una masa muy pesada, sino que ahora

se van a levantar las 3 masas de menor tamaño, pero van a bajar en tiempos desfasados milésimas de segundo, por lo que se va a tener el efecto de que bajan en el mismo tiempo, haciendo que la presión hidrodinámica se incremente por tres en el mismo ciclo, esto se debe que al levantar la primera válvula existe una energía remanente que si no existieran las otras dos válvulas se desperdiciaría haciendo que la tubería de entrada se desgaste más rápidamente (Bertinat et al., 2012).

Adicionando válvulas nos da la ventaja de combatir los principales problemas que tienen los arietes hidráulicos convencionales como son: el excesivo peso de la máquina, grandes volúmenes de agua para su funcionamiento y por tanto, su baja eficiencia (Bertinat et al., 2012)

3.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD).

Para Versteeg & Malalasekera (2007) la CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*), es el análisis de sistemas que involucran flujos de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados como reacciones químicas mediante simulación por ordenador. La técnica es muy poderosa y abarca una amplia gama de áreas de aplicación industriales y no industriales.

(Guevara-Luna, 2015), añade que para describir cuantitativamente un sistema de fluidos es necesario solucionar sistemas de ecuaciones diferenciales parciales correspondientes a los fenómenos involucrados (Ecuaciones de Navier-Stokes), estas ecuaciones no tienen solución analítica, salvo para algunos casos muy simplificados, razón por la cual es necesario el uso de herramientas de cómputo para dar solución numérica al problema.

Versteeg & Malalasekera (2007) indica que los procesos CFD están estructurados entorno a un proceso de modelamiento basado en tres etapas (i) un pre-procesamiento, (ii) un procesamiento y (iii) pos-procesamiento

3.3.1. Herramienta

La herramienta utilizada es el software comercial ANSYS Fluent (2019 R1), es un software de simulación ingenieril que posee varios módulos para procesos de simulaciones con fluidos, flujos, transferencia de calor o reacciones químicas en CFD. En este caso de estudio nos ayuda a analizar de una manera rápida y profunda el desempeño del flujo en el dominio del ariete hidráulico multipulsor.

3.3.1.1. Pre-procesamiento

El pre-procesamiento es la entrada de un problema de flujo en un programa CFD, definiendo de esta manera los objetivos, condiciones de entrada, criterios de análisis y demás actividades que tendrán por objetivo validar el modelamiento. Las actividades de entrada en el pre-procesamiento implican:

(i) Definición de la geometría en el dominio de interés.

(ii) Generación de la malla (división del dominio en pequeños subdominios que no se superponen pueden ser volúmenes o elementos).

(iii) Selección de los fenómenos físicos y químicos del proceso de modelamiento.

(iv) Definición de las propiedades del fluido

(v) Especificaciones de las condiciones de contorno.

La solución de un problema de flujo (velocidad, presión, temperatura, etc.), se rige por el número de elementos de malla en el dominio de la simulación, en general cuanto mayor es el número de elementos mejor es la precisión de la solución. Las mallas optimas a menudo no son uniformes, tienen mayor afinidad en las áreas donde ocurren grandes variaciones en la geometría y más gruesas en regiones con pocos cambios.

3.3.1.2. Procesamiento

El procesamiento básicamente es la solución de ecuaciones diferenciales, este trabajo lo ejecuta el computador. Existen tres técnicas de solución numérica, método de diferencia finita, método de elementos finitos y método espectral. Siendo estas fundamentales para estudio de códigos CFD. Este proceso consta de las siguientes fases:

(i) Integración de las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido sobre los volúmenes de control en el dominio.

(ii) Discretización: conversión de las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones diferenciales.

(iii) Solución de las ecuaciones algebraicas mediante el método iterativo.

3.3.1.3. Post- procesamiento

Esta etapa está ligada a la presentación analítica de los resultados obtenidos, dependiendo del tipo de análisis planteado, así permitiendo realizar un reproceso de los pasos anteriores para poder realizar ajustes necesarios en el caso de que el análisis sea erróneo o no converja adecuadamente.

3.4. Modelos numéricos para el análisis del flujo de fluidos

Existen herramientas computacionales capaces de analizar e incluso predecir el comportamiento de un fluido en un ámbito delimitado, el análisis de flujos computacionalmente es complejo, para el cual la selección del modelo matemático es el reto, ya que así se garantizará la solución adecuada.

3.4.1. Modelo de pronóstico

Modelos de pronóstico son los que pueden describir la evolución temporal de las variables meteorológicas a partir de la situación inicial y las condiciones de contorno que pueden, a su vez variar con el tiempo. Resuelven ecuaciones no estacionarias. Estos modelos meteorológicos se utilizan para pronosticar la evolución temporal del sistema atmosférico a través de la integración del espacio-tiempo de la ecuación de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento, energía; y en su caso, otras sustancias como los gases (Reinoso-Avecillas, 2021).

La principal diferencia entre los modelos de pronóstico viene dada por las aproximaciones utilizadas para solucionar las ecuaciones de conservación. Por ejemplo, si considera el flujo incompresible, se utiliza la aproximación de Boussinesq, o supone condiciones hidrostáticas. La eficacia y la limitación de cada aproximación o parametrización están estrictamente ligadas a las escalas espaciales y temporales a las que se aplica el modelo (Reinoso-Avecillas, 2021).

3.4.2. Modelo de flujo hidrostático

Las aproximaciones hidrostáticas consisten en despreciar la aceleración vertical frente al gradiente de presión en dirección vertical y las fuerzas gravitatorias, que se equilibran entre ellas. Esto implica que la escala vertical de movimiento tiene que ser menor que la escala horizontal. Aplicaciones realizadas muestran que los modelos hidrostáticos pueden describir

circulaciones térmicas en la superficie terrestre, en el mar; así como el flujo estratificado de manera estable en terreno complejo de pendiente moderada (el ángulo de la pendiente debe ser menor de (45°). También han sido ampliamente

utilizados en el pasado en el modelado de meso escala, debido a las ventajas computacionales (Reinoso-Avecillas, 2021).

3.4.3. Modelo de turbulencia

La turbulencia puede ser caracterizada como el movimiento caótico del fluido; su incremento está en directa dependencia de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el fluido. Cuando las fuerzas viscosas son menores a las inerciales, tiene lugar la formación de remolinos tanto a pequeña escala como a escalas mayores (Hunt, Tampieri, Weng, & Carruthers, 1991).

Según Guevara-Luna, (2015), un flujo se define como turbulento según el criterio del número de Reynolds, el valor de este número es el principal criterio para definir si un flujo es turbulento o no, y si en efecto es necesario implementar un modelo de turbulencia. El criterio del número de Reynolds para determinar si el flujo es o no turbulento se describe a continuación:

En el caso de flujos externo se tiene que:

- $Re \geq 500000$ si el flujo se da sobre una superficie.
- $R \geq 20000$ si el sistema consiste en flujo alrededor de un obstáculo.

Para el caso de flujos internos o confinados se tiene el siguiente criterio:

- $Re \geq 2300$ en ductos o tuberías, y otros tipos de flujos confinados.

Para cualquiera de los casos el número de Reynolds se define como: $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$, donde L es la magnitud de la dimensión mayor (Diámetro de tubería, Longitud, Diámetro hidráulico, etc.). Otros factores como la trayectoria, tipos de accesorios o perturbaciones pueden provocar la presencia de flujo turbulento a valores diferentes del número de Reynolds.

La turbulencia puede ser caracterizada como el movimiento caótico del fluido; su incremento está en directa dependencia de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el fluido.(Reinoso Avecillas, Jara Cobos, Gomez del Pino, & Nieto Londoño, 2016)

3.4.4. Modelo de RANS

El modelo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes); describe el comportamiento de un flujo turbulento; utilizando aproximaciones basadas en el conocimiento de las propiedades de la turbulencia del flujo, para dar soluciones aproximadas promediadas en el tiempo a las ecuaciones de Navier-Stokes. En los flujos turbulentos, la velocidad y la presión, son funciones variables en tiempo y espacio; las cuales se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional. Después de promediarlas se obtienen términos adicionales que requieren la adición de otras ecuaciones para cerrar el sistema (Reinoso-Avecillas, 2021).

4. Marco metodológico

En este capítulo se indica de forma descriptiva el proceso mediante el cual se desarrolló la simulación numérica de un prototipo de ariete hidráulico multipulsor, indagando en el proceso de selección y definición del modelo matemático utilizado, y así, definiendo los parámetros y las condiciones iniciales de diseño del modelo.

Para el análisis hay que tener en cuenta la continuidad del flujo, como indica Ollague, Azanza, & Reinoso, (2014), partiendo del principio básico en el estudio del movimiento de fluidos, menciona de la masa no se crea ni se destruye, sino que se conserva. Se obtiene que entre los extremos del tubo de corriente exista una conservación del flujo de masa.

El proceso que se realiza es fundamentalmente centrado en el diseño y configuración del ariete hidráulico multipulsor estudiado por parte de los autores del trabajo de investigación denominado como “Diseño de un prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor de abastecimiento de agua para irrigación” (Bustamante, Quezada & Reinoso, 2009).

4.1. Software utilizado

Para definir el dominio del sistema de estudio se utilizó el módulo Desig Modeler, este módulo es una extensión dentro de la interface de ANSYS R1 2019.

De la misma manera, como ya se explicó anteriormente el módulo que se utilizó para el análisis matemático del domino de estudio es ANSYS R1 2019 - Fluent, del cual se indica a continuación cada una de sus etapas de procesamiento.

4.2. Características y consideraciones de los elementos a simular

Para estudios CFD es necesario establecer parámetros de dominio y características de consideración de los elementos participantes en el proceso, esto nos ayudará a mirar con claridad los resultados obtenidos, por ende, las limitaciones serán las siguientes:

Como principal elemento de consideración están las válvulas de impulso, las cuales serán tomadas en cuenta como válvulas de retención que se abrirán y se cerraran en un ciclo establecido de trabajo, este movimiento estará delimitada por una velocidad angular la cual está diseñada en función del periodo de la válvula de impulso original. Por lo general para mejorar el rendimiento del ariete y garantizar una mayor presión en el sistema se opta por colocar pesas sobre las válvulas de impulso, en este caso de estudio no se tomará en cuenta estos pesos ya que, las válvulas de impulso realizaran un movimiento de rotación mas no un movimiento lineal.

El siguiente elemento a considerar será el cuerpo de la bomba de ariete, siendo este limitado desde la válvula de entrada de fluido hasta el límite de entrada de la válvula de retención, es decir no incluirá la válvula de retención ni elementos posteriores a esta.

El diseño de estudio será modelado de forma bidimensional, la cual será denominado como simetría, siendo esta una denominación que indicara que la superficie no será ni entrada ni salida, de esta manera el flujo rebotara al dominio.

4.2.1. Identificación de variables

En la **Tabla *4.2-1*** se presentan los datos extraídos del trabajo de titulación referenciado indicado anteriormente.

Tabla 4.2-1. *Datos de operación de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor .*

Denominación	Símbolo	Cantidad	Unidad
Velocidad del flujo	v	2.697	m/s
Caudal máximo	Q	5.46 e-3	m^3/s
Tiempo de un ciclo	T	1	s
Caudal bombeado/ciclo	Q_b	1.28 e-4	m^3
Presión dinámica	P_D	1201.25	Pa
Tiempo de cierre de la válvula	T	0.00313	s
Presión máxima en el ARTHM[1]	P_{max}	2	Mpa
Presión mínima en el ARTHM	P_{min}	1.96	Mpa

Fuente: Tomado de (Bustamante, Quezada & Reinoso, 2009).

4.3. Modelado del problema

En la **Figura *4.3-1*** se indica el modelo físico que se pretende analizar exponiendo en ella algunas de las principales consideraciones tomadas al momento de diseñar. En la **Tabla *4.3-1*** se expone estas consideraciones.

[1] Ariete hidráulico multipulsor.

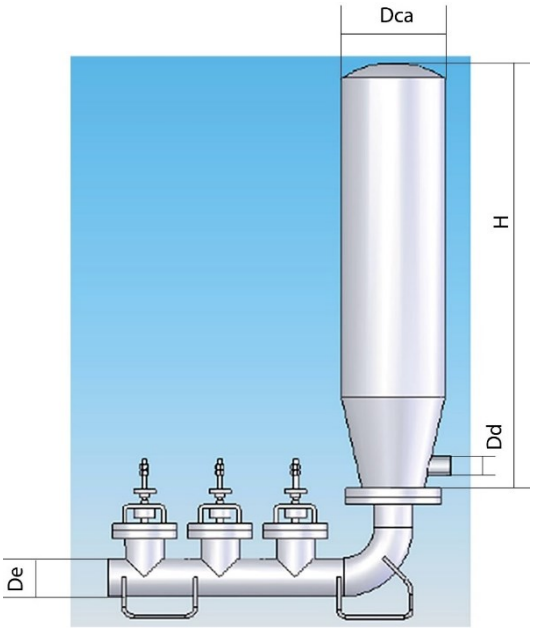


Figura 4.3-1. Modelo físico del caso de estudio.

Fuente: autoría propia.

El modelado CFD del caso de estudio requiere de ciertos pasos explicados anteriormente, para llevar a cabo la simulación. Para determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos que se explica a continuación, se realizó diferentes análisis numéricos para el estudio de sistemas turbulentos.

4.3.1. Pre-procesamiento.

Como ya se explicó anteriormente esta etapa de entrada es fundamental para el modelado de la cual dependerá mucho la calidad de los resultados que se obtengan. Una vez teniendo en cuenta el sistema analizar se determinará el dominio de estudio, las variables y fenómenos involucrados. Siendo este el caso se estudiará como dominio (**Figura *4.3-2***) el fluido que circula por el cuerpo del ariete hidráulico multipulsor incluyendo el dominio de cada una de las válvulas, con el fin de optimizar el proceso de resolución del modelo matemático computacional se ha decidido tomar como dominio de estudio una parte simétrica (**Figura *4.3-3***) del dominio general ya que, el flujo se comportará de la misma manera en esta porción, por la misma razón se omitirá la cámara de aire del sistema, ya que, la presión que esta ejerce sobre el sistema se mantendrá constante en el ciclo de trabajo del ariete hidráulico multipulsor. Las válvulas de impulso serán diseñadas como válvulas de paso, para el diseño de estas se tendrá en cuenta el diámetro interno de la tubería de la cual se restará una cantidad que se crea necesaria para que

la válvula no tenga ningún efecto de retardo o fricción en su desempeño con la pared del flujo, esta válvula tendrá un espesor de 5 mm según el análisis de diseño de (Sarmiento, 1982).

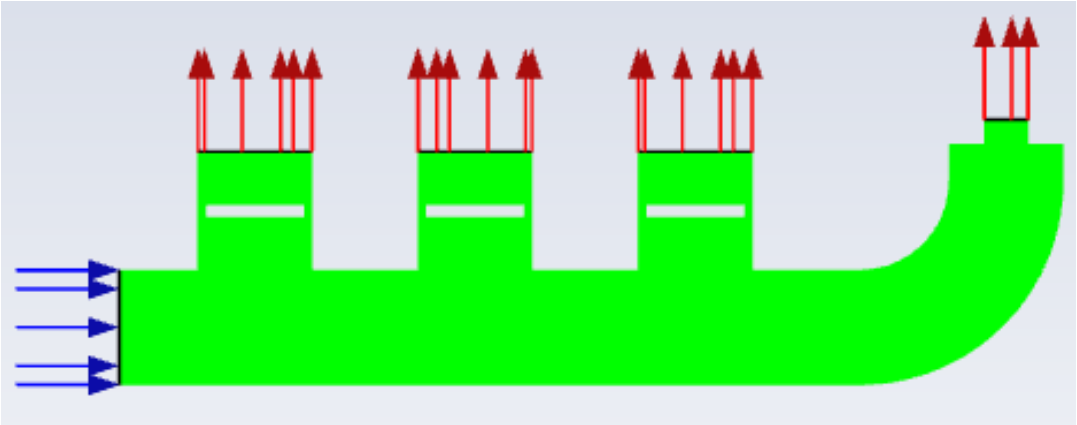


Figura 4.3-2. Dominio computacional de bomba de Ariete Hidráulico - caso de estudio.

Fuente: Autoría Propia

Las características de diseño de las partes principales del ariete hidráulico multipulsor, según (Reinoso et al., 2009), fueron basadas en un caso empírico, desarrollado por parte del investigador Isauro Rodríguez, en el cual se determina las siguientes relaciones en función del diámetro de entrada:

$$Diámetro\ de\ la\ válvula\ check = 0.5\ diámetro\ de\ entrda \quad (2)$$

$$Diámetro\ de\ la\ cámara\ de\ aire = 3\ diámetro\ de\ entrada \quad (3)$$

$$Altura\ cámara\ de\ aire = 10\ diámetro\ de\ entrada \quad (4)$$

$$Diámetro\ de\ descarga = 0.5\ diámtro\ de\ entrada \quad (5)$$

Por lo tanto, las dimensiones principales del ariete hidráulico se establecen de la siguiente manera:

Tabla 4.3-1 . *Dimensiones principales del ariete hidráulico.*

Denominación	Dimensión [pulga]
Diámetro de entrada (De)	2
Diámetro válvula check (Dvc)	1
Diámetro de cámara de aire (Dca)	6
Altura cámara de aire (H)	20
Diámetro de descarga (Dd)	1

Fuente: Adaptado de Bustamante, Quezada & Reinoso, (2009).

4.3.1.1. Generación del modelo físico

Con la información obtenida y basándome en las consideraciones planteadas en el punto anterior se procederá a diseñar el dominio de estudio con el fin de optimizar el trabajo del computador. El modelo 2D (**Figura *4.3-3***), será suficiente para poder determinar el comportamiento del flujo en las zonas de estudio, a medida que el flujo avance por el dominio tubular, esta ira desarrollando un perfil de velocidad.

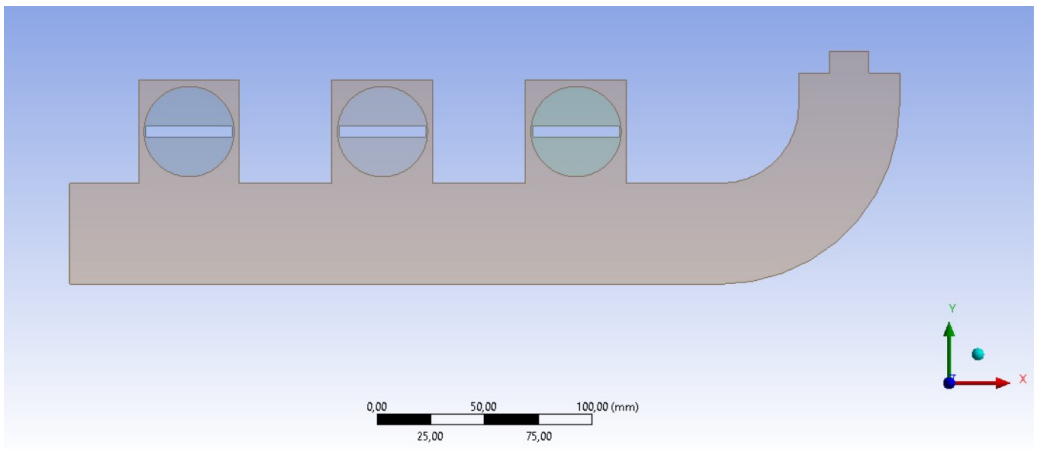


Figura 4.3-3. Dominio computacional 2D bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor.

Fuente: Autoría Propia.

El diseño de estudio aquí sustentado fue desarrollado en el software ANSYS en el módulo denominado Design Modeler[2]

4.3.1.2. Generación del mallado

Una vez diseñado la superficie de control, se importará este archivo a un nuevo módulo que se encuentra dentro del entorno del software ANSYS conocido como Mesh, el cual se encargará de generar la malla de acorde a las consideraciones necesarias. El proceso de mallado está basado en el método de volúmenes finitos (MVF), el cual se rige en dividir el dominio de control en número finito de volúmenes. este proceso se llama discretizacion del modelo se realiza teniendo en cuenta la complejidad del elemento a estudiar, siendo esta la etapa que más tiempo y conocimiento requiere por parte del estudiante dado que de esta depende si los resultados que arroje el sistema sean coherente o erróneo en su totalidad, es decir, mientras más denso sea el mallado más erróneos serán los resultados, ya que, la densidad de los elementos afecta directamente a los resultados.

Se generará una malla en 2D con elementos gobernantes de la forma de cuadriláteros, cabe recalcar que los elementos no serán en su totalidad de esta forma, dado que, en el sistema por su geometría será necesario de otro tipo de elemento de mallado para una mejor adaptación y análisis, el tamaño de elementos de la malla es determinante para obtener un buen resultado en la simulación.

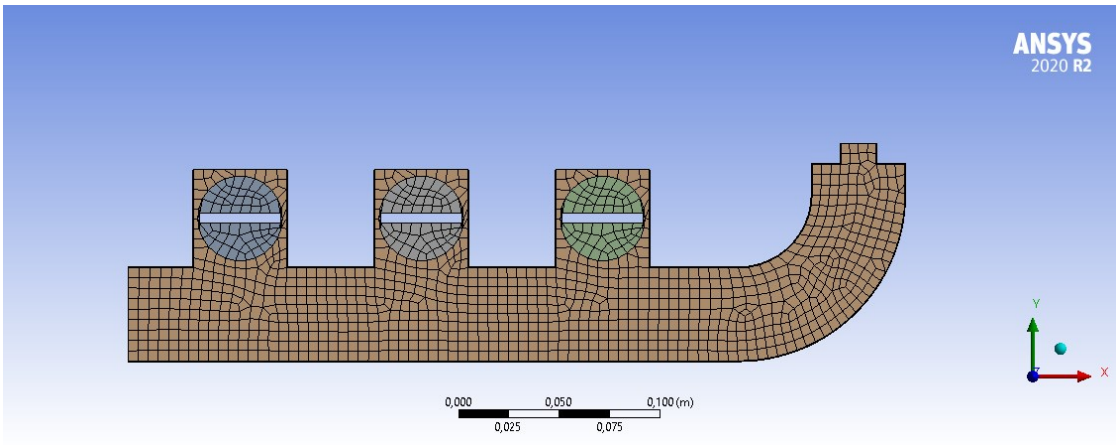


Figura 4.3-4. Malla de dominio computacional de bomba ariete hidráulico.

Fuente: Autoría Propia.

[2] http:www.ansys.com

Con el fin de poder definir las condiciones de frontera en el exterior e interior del dominio de control se asigna nombres a cada una de sus partes (Figura 4.3-5), teniendo en cuenta que si no se asigna un nombre el software lo definirá o reconocerá como pared.

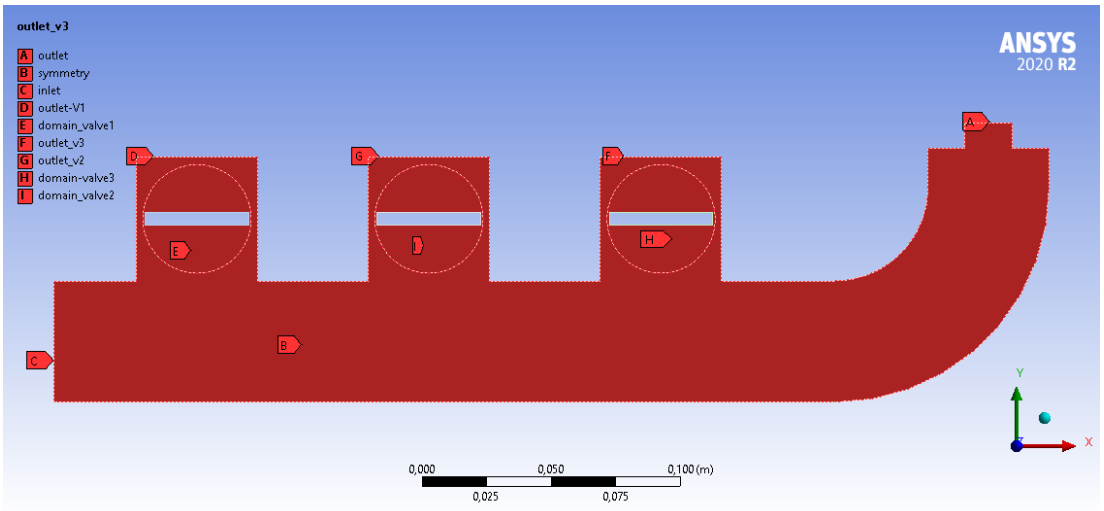


Figura 4.3-5*:* Identificación de superficies del dominio computacional de bomba de ariete hidráulico.

Fuente: Autoría propia.

El mallado que se asignó es de tipo no estructurado en todo el domino de estudio, este tipo de malla requiere un menor tiempo para resolver las ecuaciones y entregar los resultados por ende ocupa menor espacio en el computador esto en comparación con un mallado estructurado. *Ansys Mesh* nos permite realizar mallados a nuestra conveniencia dependiendo si nuestro dominio de control es del tipo 2D o 3D, el tipo de método dominante que se empleoó está basado en cuadriláteros, de igual manera en el dominio de cada válvula se realiza un *sizing* para poder manipular a futuro cada una de las partes, por último en los contornos de la geometría se realiza una inflación, ya que en estos sectores el flujo va a tener mayor fricción y dé esta manera se podrá asimilar mejor el resultado. Ver **Figura *4.3-6.***

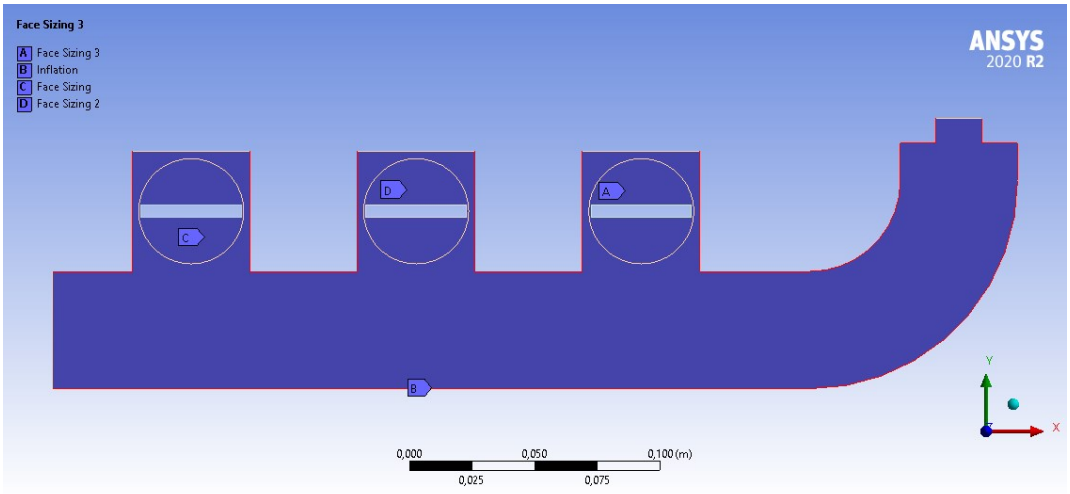


Figura 4.3-6. Identificación de mallado particular de cada elemento

Fuente: Autoría propia.

Para realizar el efecto de malla en movimiento se crean regiones de contactos entre las zonas de movimiento y las zonas estáticas, esto permitirá que a pesar de tener cuerpos diferentes los resultados se traspasen de un cuerpo hacia el otro, por lo que los elementos de mallado entre estas dos zonas deberían ser lo más similar posible. En la **Figura *4.3-7*** se indica las zonas ya mencionadas, cabe recalcar que para cada zona de movimiento se de hacer el mismo procedimiento.

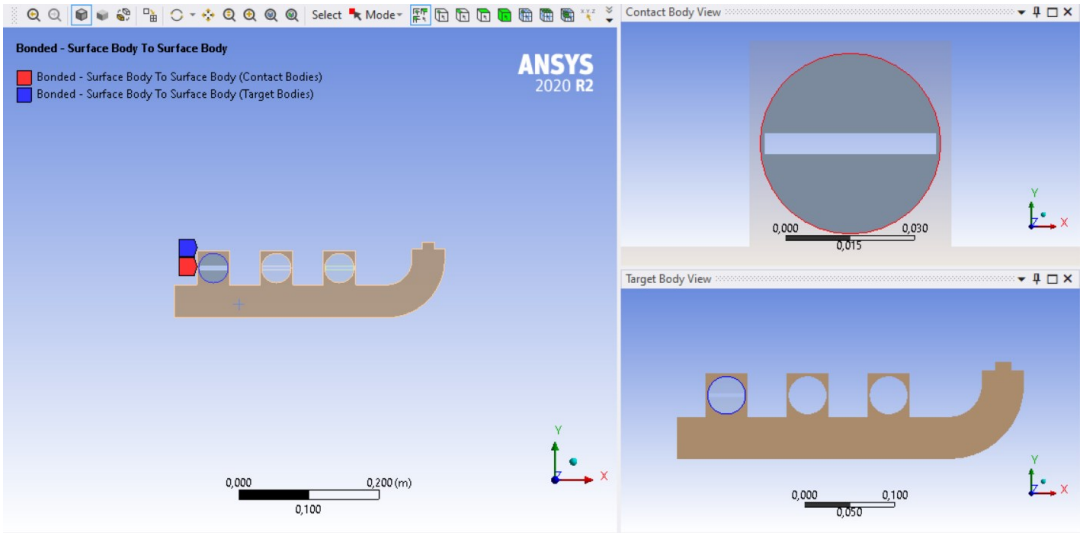


Figura 4.3-7: Identificación de características de región de contacto válvula 1.

Fuente: Autoría propia.

4.3.1.2.1. Estudio de independencia de malla

Para obtener una geometría con un mallado de buena calidad se debe realizar un estudio de convergencia o independencia de malla, realizando una discretización (refinamiento) de estos elementos.

Como se indica en la **Figura *4.3-4*** el mallado por defecto, el cual se evaluará como mallado inicial para posteriormente realizar refinamientos y obtener el mallado ideal para el análisis del proyecto, el número de elementos aumentara de acorde con el refinamiento de la malla, sabremos que se obtuvo un mallado independiente de los resultados cuando estos no varíen intensamente al incrementar el número de elementos, por ende, de esta manera se seleccionara el modelo a estudiar teniendo en cuenta también el parámetro esencial que es el tiempo de integración y gasto computacional.

Zachár, (2010) para estimar el error establece que $Nua\ y\ Nui$ son variables obtenidas las cuales se han definido como, actual e ideal respectivamente, planteando como se indica en la ecuación (6), de esta manera para estimar el error existente en el proceso de discretización se define como valor ideal los resultados obtenidos en la simulación con la malla más fina, por ende como valor actual se toma cada uno de los resultados obtenidos con los diferentes tipos de malla anteriores a este.

$$Error\ [\%] = 100\left(\frac{Nua - Nui}{Nui}\right) \tag{6}$$

En la **Tabla *4.3-2*** se indica los resultados obtenidos en el proceso de discretización, se evalúa el incremento del número de elementos con respecto a la variación de presión de salida en el sistema, esta variación nos arrojará un error porcentual con respecto al valor de presión tomado como ideal, se recomienda que este error debe ser inferior al 10 % dependiendo de las consideraciones por las cuales se hayan evaluado. Se realiza seis estudios con un incremento considerativo en los elementos.

Tabla 4.3-2. *Error de discretización.*

Malla	Número de elementos	Tamaño de elementos [mm]	Presión [Pa]	Error [%]
Caso 1	2.172	5,0 E-03	17,48762	29,69414
Caso 2	49.997	8,0 E-04	24,64889	10,59408
Caso 3	119.078	5,0 E-04	10,45381	53,09607
Caso 4	312.331	3,0 E-04	23,21694	4,16924
Caso 5	685.782	2,0 E-04	21,89549	1,759803
Caso 6	1 152.280	1,5 E-04	22,28771	-----

Nota: En el tipo de malla denominado caso 4 y caso 5 se puede observar un error mucho menor al 10%.
Fuente: Autoría propia.

En la **Figura *4.3-8*** se puede observar que el error relativo obtenido entra dentro del porcentaje recomendado después de la tercera simulación, evidenciando que el valor de la presión no varía significativamente con relación a las anteriores, por lo tanto, se podría decir que se alcanza la independencia de la malla logrando también una mejor convergencia de la solución y de esta manera se determina el modelo en el cual se va a realizar los estudios planteados en este proyecto de titulación. Hay que tener en cuenta que esto no asegura que los resultados de la simulación sean iguales a los de la realidad, pero sí muy cercanos.

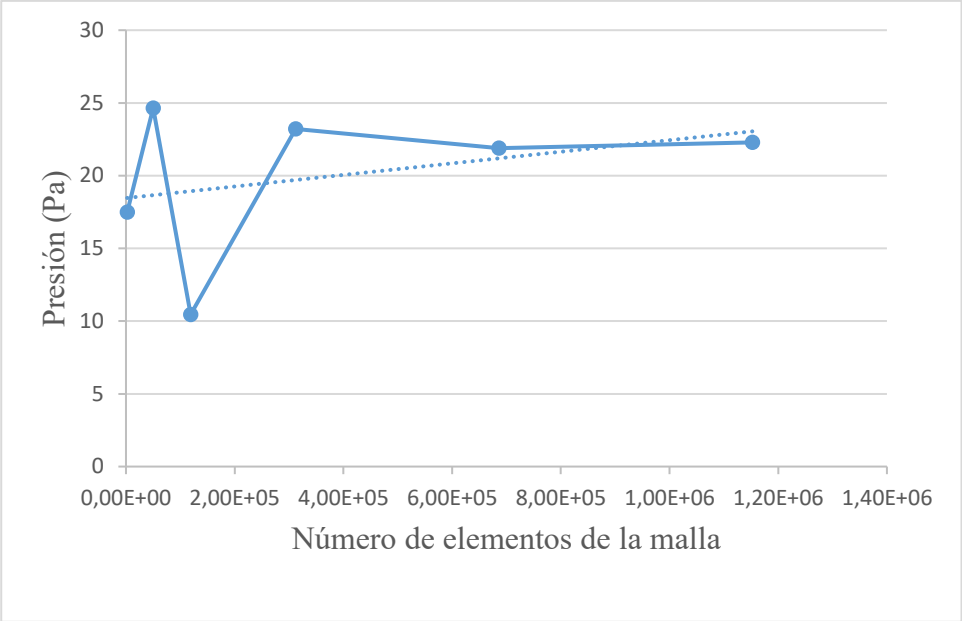


Figura 4.3-8. Resultados del proceso de independencia de malla.

Fuente: Autoría propia

4.3.1.2.2. Calidad de malla

Entonces, el modelo a estudiar será el caso 5 siendo este el que menor porcentaje de error presenta en el análisis anterior. la calidad de la malla es posible evaluar de diferentes maneras, se pueden presentar como calidad del elemento (*Element Quality*), estadística de malla (*Mesh Statistics*) y métricas de malla (*Mesh Metric*) dentro de esta haciendo hincapié en calidad ortogonal (*Orthogonal Quality*) y oblicuidad o asimetría (*skewness*).[3]

La calidad del elemento y métrica de malla tiene valores que varían entre 0 y 1, los valores que se acerquen a cero serán denominados como malos y a medida que los valores se acerquen a 1 esta calidad aumentara. La oblicuidad toma los mismos valores, pero al contrario mientras más se acerque a 0 será lo ideal. El valor que se verifica con la metrica de la malla es una relacion entre el volumen y la longitud de borde de un elemento de malla.

En la **Figura *4.3-9***, se puede visualizar la calidad de los elementos de mallado, los cuales en su mayoría son cercanos a 1 por lo que se puede afirmar que el mallado es de buena calidad.

[3] http:www.ansys.com

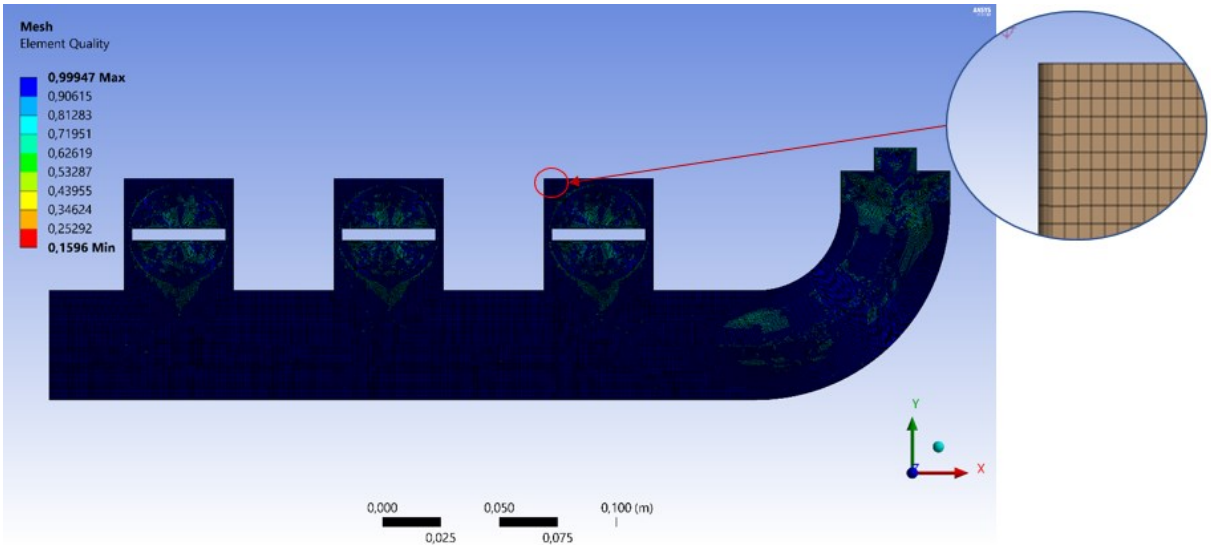
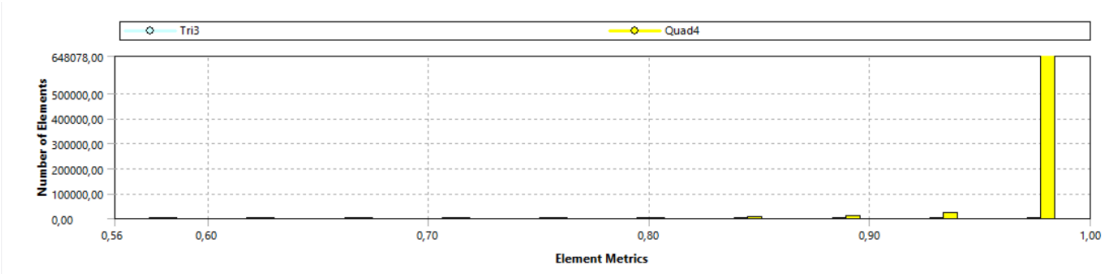


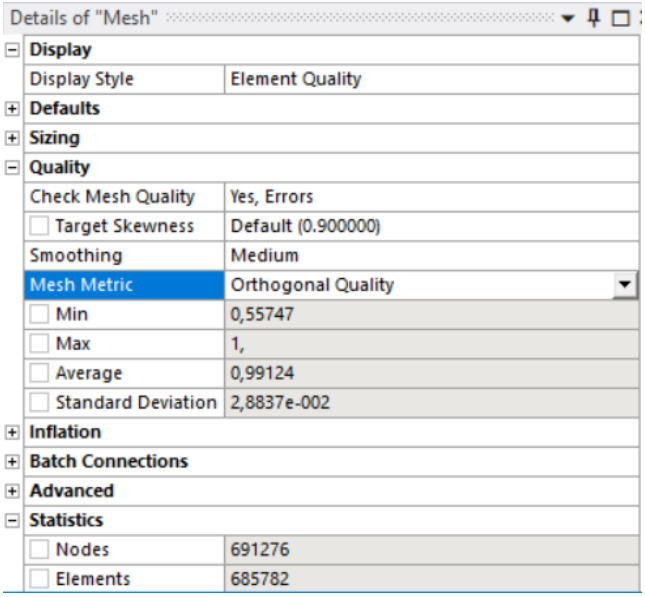
Figura 4.3-9: *Reporte de calidad de elementos de malla.*

Fuente: Autoría propia

En la siguiente **Figura *4.3-10*** en el literal (a) observamos la calidad ortogonal de los elementos en la cual destaca la barra de color amarillo estando está muy cercano a 1 indicando los elementos cuadriláteros mientras que de color azul los elementos triangulares, siendo estos últimos en menor cantidad, por lo tanto, en (b) se presentan el valor mínimo, máximo, la media y desviación estándar de los elementos, como también el número de elementos y nodos que reinan en el modelo antes mencionado.



(a)



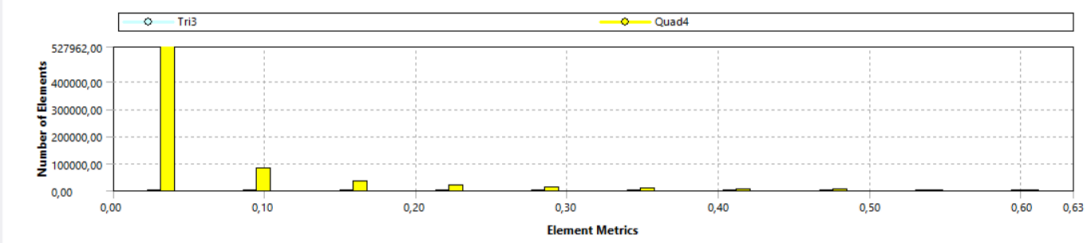
Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Element Quality
Defaults	
Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0,55747
Max	1,
Average	0,99124
Standard Deviation	2,8837e-002
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	
Nodes	691276
Elements	685782

(b)

Figura 4.3-10: Reporte de Calidad Ortogonal.

Fuente: Autoría propia.

La **Figura** ***4.3-11*** nos indica las características de oblicuidad de los elementos de mallado. en (a) se aprecia que el mallado tiene una oblicuidad aceptable, la barra de color amarillos destacan los elementos cuadriláteros mientras que de color azul los elementos triangulares, y en (b) se presentan el valor mínimo, máximo, la media y desviación estándar de mencionados elementos.



(a)

Details of "Mesh"

Display Style	Element Quality
Defaults	
Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
Min	1,3057e-010
Max	0,63434
Average	4,496e-002
Standard Deviation	7,9141e-002
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	
Nodes	691276
Elements	685782

(b)

Figura 4.3-11: Reporte de Características de Oblicuidad.

Fuente: Autoría propia.

4.3.1.3. Condiciones de frontera.

Jakeman, Letcher, & Norton, (2006), indican que en CFD las fronteras son los límites de los modelos físicos y a ellas se les asignan valores iniciales para resolver las ecuaciones diferenciales que los determinan. La definición acertada de los valores de fronteras y sus condiciones es importante pues de ellos depende lo que sucede al interior del dominio de estudio. Para el análisis de este proyecto se puede definir diferentes condiciones de frontera, las condiciones de las ecuaciones de limitación pueden estar sujetas a masa, energía y momento, estas rigen en el límite del dominio de la geometría y dentro de ella quedando establecidas bajo los conceptos del software de simulación.

4.3.1.3.1. Condiciones de entrada (Inlet)

La tasa de flujo de entrada se define como *Mass Flow Inlet* definida en kg/s, con una *Turbulent Intensity* del 5 % y un valor de 10 para *Turbulent Viscosity Ratio*.

4.3.1.3.2. Condición de salida (Outlet)

La salida en el límite interior de la válvula de retención se define como *Mass Flow Outlet* en unidades similares a la tasa de flujo de entrada.

4.3.1.3.3. Condiciones de salida de las válvulas.

Outlet _v1, se define así a la salida de la válvula de impulso, con características de *Mass Flow Outlet* en kg/s. el caso de análisis cuenta con tres válvulas de impulso quedando establecidas como *Outlet_v2* y *Outlet_v3* las dos siguientes salidas.

4.3.1.3.4. Dominio de las válvulas de impulso (Domain_valve)

Se define así al dominio de las válvulas de impulso, es decir, es el espacio en el que las válvulas de impulso cumplirán su objetivo. Estas válvulas cumplirán el rol de generar presión al instante que se cierren y dejar salir el fluido (perdida de fluido) al momento que se abran en un tiempo determinado, cumpliendo un ciclo de trabajo, la apertura y cierre de estas válvulas está basado en la velocidad angular determinada de la siguiente manera:

$$\omega = \frac{\theta}{t} \tag{7}$$

o a su vez:

$$\omega = 2 * \pi * f \tag{8}$$

El cuerpo del ariete toma el nombre de *symmetry*, en función del diseño mas no en función de condiciones de frontera, por lo cual los contornos del sistema que no han sido nombrados estarán tomados en cuenta como paredes estacionarias, con el fin que el fluido no sobrepase los límites de la geometría.

4.3.1.4. Determinación de Parámetros de entrada

Los parámetros principales de entrada para el análisis numérico del ariete hidráulico se presentan en la **Tabla *4.3-3***.

Tabla 4.3-3. *Parámetros de análisis*

	Valor	Unidad
Velocidad angular	6.28	rad/s
Caudal másico	5.46	kg/s

Nota: Las cantidades están calculadas con base en datos a Bustamante, Quezada & Reinoso, (2009). Fuente: Autoría propia

4.3.1.5. Escenarios de simulación.

Con el fin de cumplir con los objetivos de este proyecto de titulación se realizará tres escenarios de análisis del sistema (**Tabla *4.3-4***), definiendo estos como: E1, para el análisis con una válvula de impulso, E2, para el análisis con dos válvulas de impulso y E3, para el análisis con tres válvulas de impulso.

Tabla 4.3-4: *Parametrización de escenarios de simulación*

Escenario	válvula 1	válvula 2	válvula 3	Variable de salida
E1	0	0	1	Caudal
E2	0	1	1	Caudal
E3	1	1	1	Caudal

Nota: Para los diferentes escenarios se restringirá el funcionamiento de las válvulas: (1) en funcionamiento, (0) bloqueada. Fuente: Autoría propia

Los tres escenarios de análisis comprenderán un estudio con las mismas condiciones y características de frontera, teniendo en cuenta que las válvulas que se desactiven serán configuradas como pared estacionaria.

4.3.2. Procesamiento

El problema para ser analizado correctamente será considerado como de estado transitorio que se lleva a cabo en un espacio bidimensional *(2D)* con una incorporación de velocidad por lo que se considera un sistema incompresible basado en presión.

4.3.2.1. Simulación numérica (set up)

Inicialmente se deberá enlazar a los módulos ya establecidos uno nuevo conocido como *Fluent* dentro del entorno de *Workbench*. Una vez enlazados los módulos se cargará la información del *Mesh*, después de haber seleccionado el tipo de precisión y establecido el número de procesadores computacionales se deberá verificar la validez de la malla para poder detectar cualquier problema que esta pueda presentar, y generar un informe de la calidad de la malla. Ver Anexo 1.

Para este tipo de modelamiento CFD se incluye el modelo de turbulencia de dos ecuaciones $k - \epsilon\ Realizable$[4] 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[5] como $1\ x\ 10^{-4}$. Los parámetros y condiciones de frontera establecidas anteriormente complementaran la solución.

El método de solución empleado es el de tipo SIMPLEC (SIMPLE-Consistent), siendo este un método de solución de convergencia rápida gracias a su factor de sub-relajación cuyo valor predeterminado es 0, para flujos dependientes del tiempo. Este método es aplicado para intervalos de tiempo pequeño teniendo un excelente mallado. Se utilizarán ecuaciones de discretizacion espacial de segundo orden. Ver Anexo 2.

Es de mucha ayuda seguir el proceso de iteración mientras se va desarrollando la solución, por lo tanto, es necesario pedirle al software que nos indique reportes esenciales y compresibles. ANSYS FLUENT (2019 R1), tiene en su árbol de solución el *Report Definitions* que nos permitirá crear un *Surface Report Definition* basado en presión (Anexo 3) de la misma manera se creará los reportes que sean necesarios para analizar el comportamiento y la convergencia del sistema.

También se establecerá una serie de punto sobre algunos límites de la geometría con el fin de extraer datos para un futuro análisis en el siguiente modulo que se utilizará para presentar los resultados.

---

[4] http:www.ansys.com

[5] https://forum.ansys.com/

Como siguiente paso se inicializará la solución definiendo que esta inicie por el límite denominado como entrada de flujo *(Inlet Mass Flow),* una vez inicializado la solución se crearan, contornos de presión y velocidad para monitorear la solución a medida que el desarrollo avance, este último es muy conveniente que se desarrolle dentro de *Fluent* ya que, a medida que se desarrolla la integración se podrá observar de forma *dinámica* lo que va sucediendo, y así poder estar más seguro de los datos que se va a observar en la presentación de resultados, ya que, de esta manera si es necesario se podrá hacer ajustes y no esperar hasta el final del proceso de desarrollo. Gracias a los contornos se podrá tener una visualización del movimiento de las válvulas y las turbulencias que se genere en la simulación.

Con el fin de realizar un tiempo de simulación de 10 segundos se configurará un time *step size* de 0.01 con 1000 iteraciones, en la **Figura *4.3-12*** podemos observar la configuración de este último paso para terminar el proceso de configuración de condiciones. Si bien es cierto debido a los monitores configurados la solución puede no llegar a completar el número de iteraciones o a su vez puede sobrepasar el mismo, esto debido a que se detendrá cuando las fluctuaciones[6] empiezan a estabilizarse.

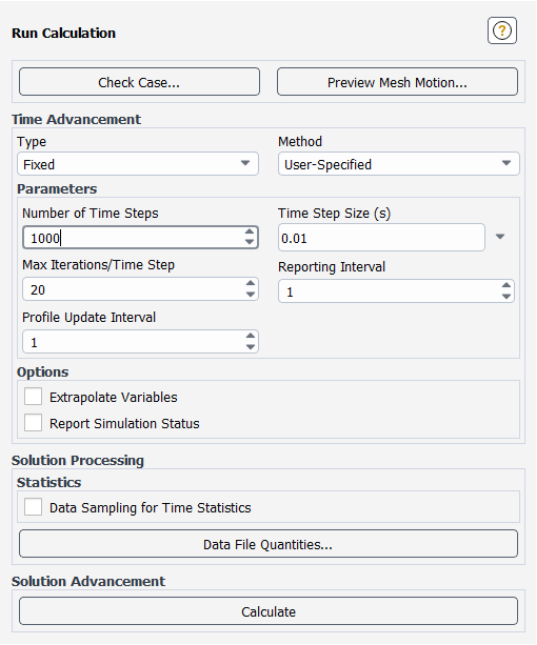


Figura 4.3-12: Características del proceso de ejecución.

Fuente: Autor

[6] Gráfico de residuos.

Para finalizar y estar seguro de que la discretización está bien configurada se deberá hacer un *Check Case* y a su vez también un *Preview Mesh Motion* siendo este el caso.

5. Resultados

En este capítulo se presenta el desarrollo de cada uno de los tres escenarios propuestos, siendo estos centrados en el incremento de las válvulas de impulso o válvulas de desperdicio del sistema, la simulación numérica se realizará con la misma geometría para los tres escenarios aclarando que los datos y gráficas que se presenten serán evaluados en los mismos tiempos de simulación numérica para cada uno de ellos.

5.1. Validación del procedimiento

Una vez elaborado la simulación numérica del objetivo presentado es necesario realizar una validación posterior del procedimiento del modelo desarrollado, para garantizar que los resultados arrojados por el software sean lo más cercano a la realidad y poder descartar posibles fallos en la interpretación del modelo. Siendo este el caso, la validación numérica computacional será de carácter comparativo con respecto a los datos experimentales del rendimiento del ariete hidráulico obtenido por (Reinoso et al., 2009)

En el desarrollo de este proyecto se obtiene una cantidad de caudal másico de entrada de 5.46 kg/s y un caudal másico de salida de 1 kg/s, obteniendo un rendimiento de 18.3 % con base en esta variable.

Reinoso et al.,(2009), analizan el sistema variando el peso muerto que está colocado sobre las válvulas de impulso y modificando la carrera de deslizamiento de dichas válvulas, obteniendo un rendimiento en porcentaje, siendo el análisis que más se acerca el denominado como *Análisis para un contrapeso de 1400 gramos y tres válvulas de impulsión,* en el cual obtienen como resultado un rendimiento máximo del 18,53% con una carrera de deslizamiento de la válvula de impulso de 3 mm. Obteniendo así, una variación mínima en los datos de simulación numérica y los datos experimentales.

5.2. Simulación de escenario *E1* (1 válvula de impulso)

Se realizará la comparación de los tres escenarios propuestos en la **Tabla *4.3-4***, esta comparación de datos estará fijada en el análisis de: velocidad, presión estática, caudal másico y caudal volumétrico en la salida del ariete.

El contorno de análisis principal será, el que se ha nominado como salida (outlet) siendo este contorno el que está ubicado en la entrada de la válvula de retención, es decir los datos que se presenten en ese punto de estudio serán antes de la válvula de retención de la bomba de ariete hidráulico multipulsor.

Como se indica en la **Tabla *4.3-4***, para el primer escenario de análisis numérico se establecerá como salida de flujo el contorno superior de la válvula 3 (outlet_v3), de la misma manera se establece la velocidad angular de dicha válvula. Por ende, el contorno de salida de la válvula 1 y válvula 2 se considerará como pared estacionaria (wall) sin fijar la velocidad angular de las mismas, logrando así que el flujo dentro de estas se llene en un tiempo mínimo no considerable para el análisis. Se cree que el flujo dentro de estas válvulas se comportará de manera estable y no intervendrá en el análisis, ya que antes de que el ariete de su primer golpe deberá primeramente alcanzar una presión mínima para cumplir su objetivo, esto se logra gracias a que el líquido al avanzar por la tubería generara un incremento en su energía cinética, logrando variar su velocidad y por ende su presión.

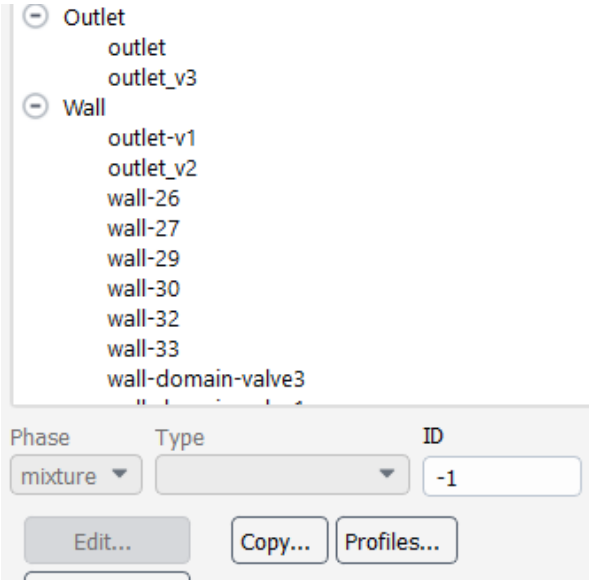


Figura 5.2-1. Contornos de salida.

Fuente: Autoría propia.

En la **Figura** ***5.2-2***, se presenta el contorno de velocidad con la válvula de impulso en condición cerrada, se puede notar el avance del flujo después de 1 segundo de integración con las condiciones ya antes mencionadas.

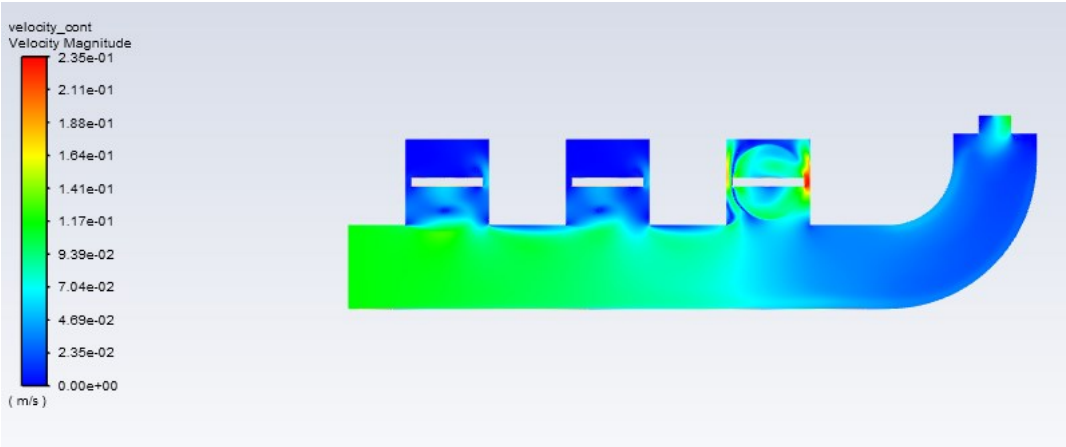


Figura 5.2-2. Contorno de velocidad – E1 posición válvula cerrada.

Fuente: Autoría propia.

A diferencia de la figura anterior en la **Figura** ***5.2-3*** se observa el avance del flujo después de haber transcurrido 2,5 segundos de simulación numérica, con la válvula de impulso en condición abierta claramente se puede apreciar que en esta condición la cantidad de fluido disminuye al llegar al área de salida (outlet), es decir una parte de este fluido se desperdiciara al momento que la válvula de impulso se abra, alcanzando una velocidad de 0.29 m/s.

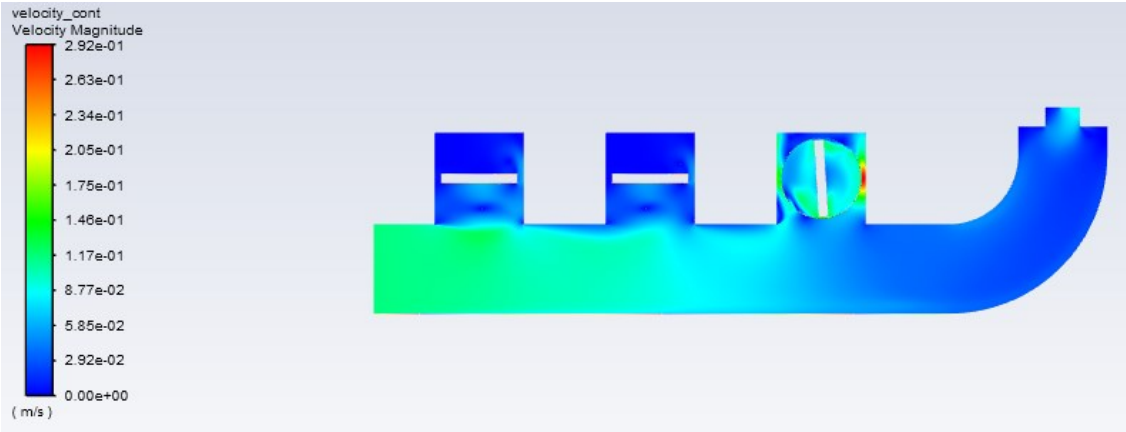


Figura 5.2-3. Contorno de velocidad - E1 posición válvula abierta.

Fuente: Autoría propia.

En la **Figura** ***5.2-4*** se indica el contorno de presión asumiendo que la válvula de impulso está 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 *5.2-5***, el análisis se realiza en un tiempo de simulación de un 1 segundo y 2,5 segundos respectivamente.

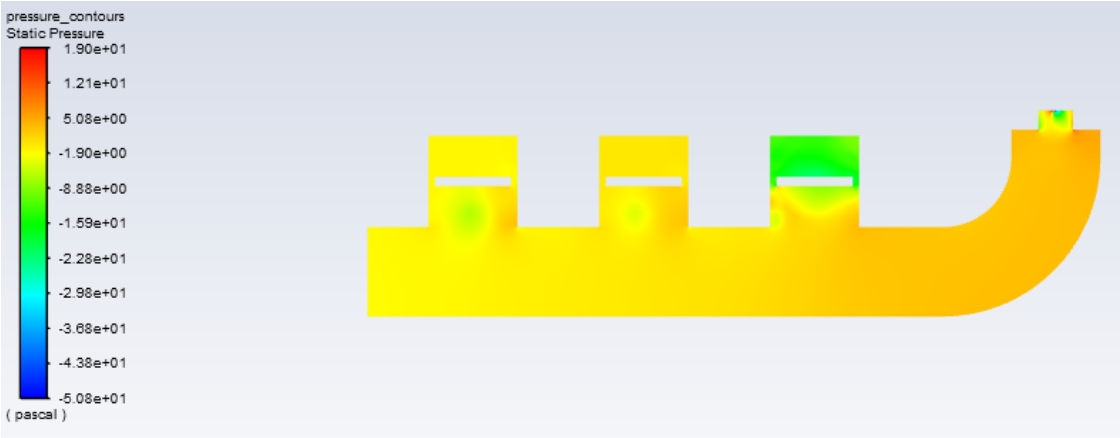


Figura 5.2-4. Contorno de presión - E1 posición válvula cerrada.

Fuente: Autoría propia.

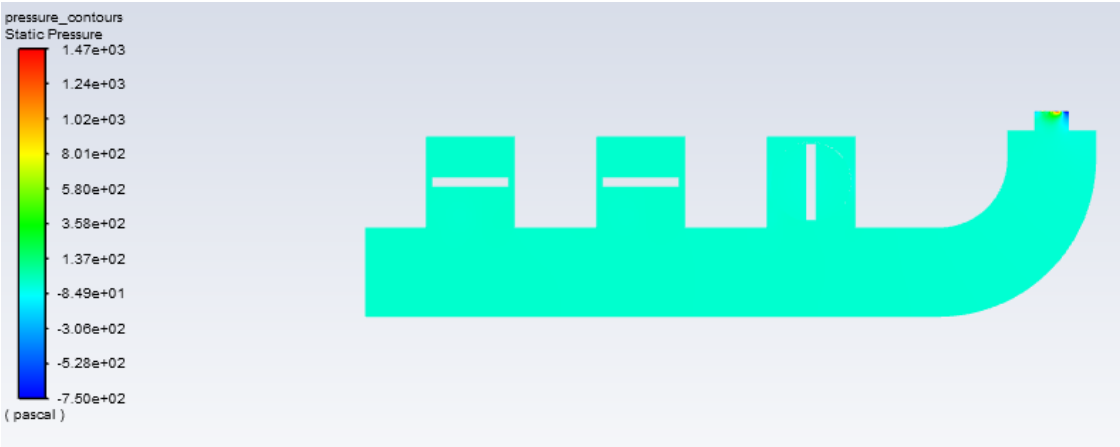


Figura 5.2-5. Contorno de presión - E1 posición válvula abierta.

Fuente: Autoría propia.

Gracias a la convergencia de la solución se puede decir que el sistema se estabilizó y se alcanzó el objetivo del análisis numérico, en la **Figura *5.2-6*** se indica el reporte de convergencia del caudal másico (*Mass Flow Rate*) en la salida de análisis establecida.

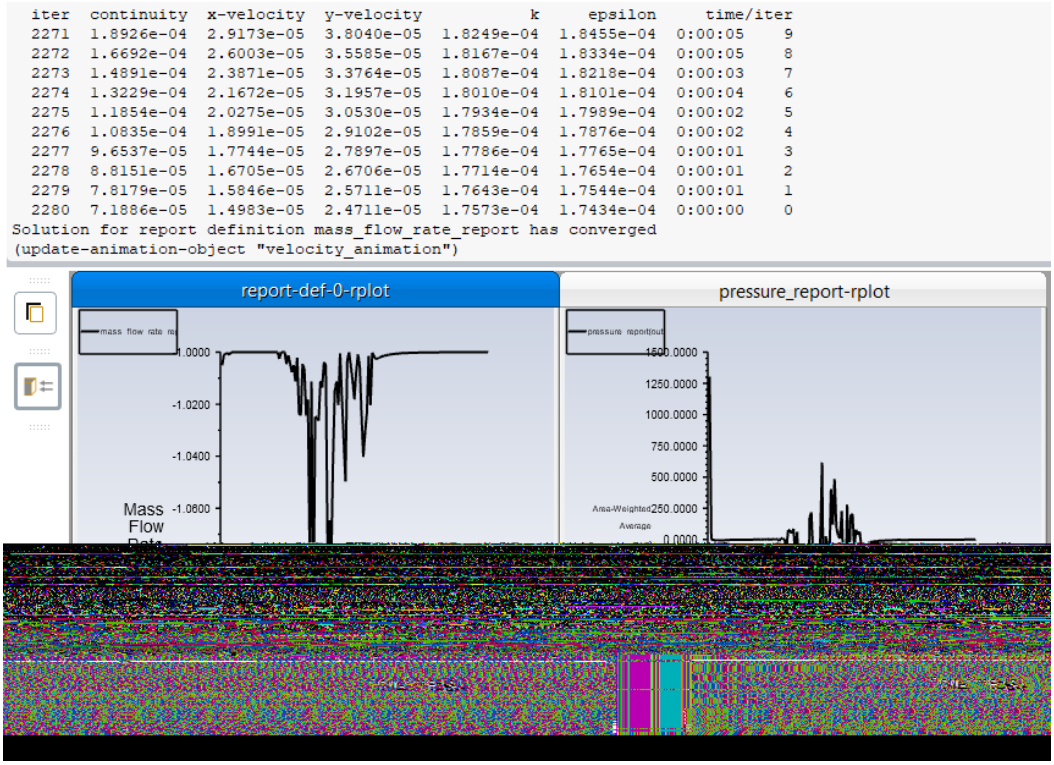


Figura 5.2-6. Reporte de convergencia de caudal másico.

Fuente: Autoría propia.

El caudal másico a través del contorno de salida del ariete hidráulico multipulsor es de 1 kg/s como se puede observar en la **Figura** ***5.2-7***, obteniendo así una pérdida alrededor del 81.7 % con respecto al caudal másico de entrada que es de 5.46 kg/s, dando como resultado un rendimiento del 18.3 %.

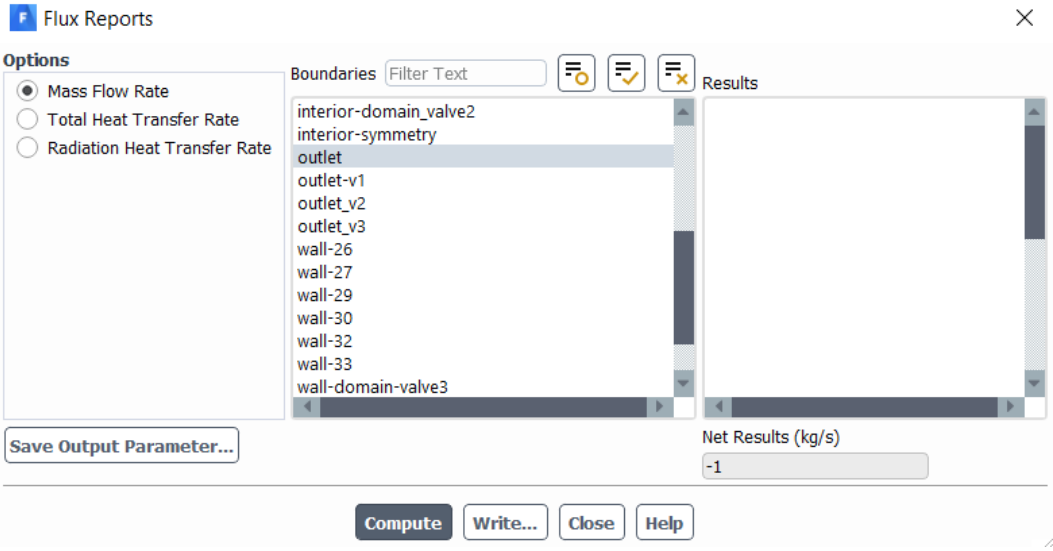


Figura 5.2-7. Reporte de caudal másico

Fuente: Autoría propia.

El caudal volumétrico calculado por el software en la salida es de 0.001 $\frac{m^3}{s}$ cómo se puede observar en la **Figura *5.2-8***.

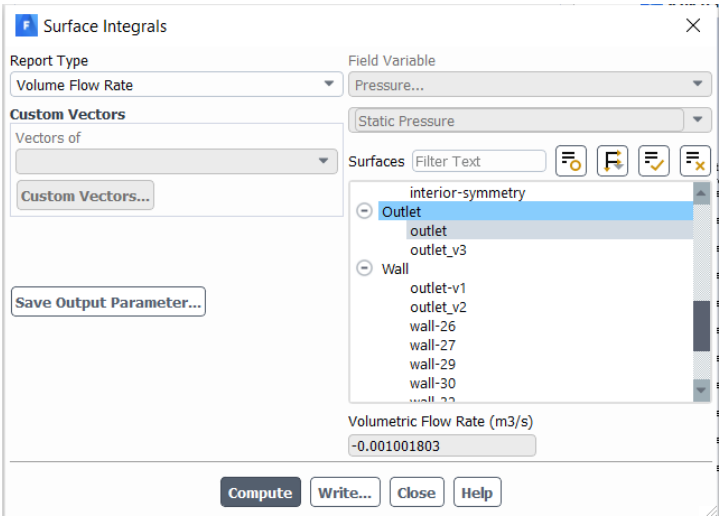


Figura 5.2-8. Reporte de caudal volumétrico.

Fuente: Autoría propia.

En la **Figura *5.2-9*** podemos observar la presión estática generada en el contorno de salida del ariete hidráulico, esta presión será la encargada de determinar cuan alto se puede elevar el líquido aprovechado por el ariete.

```
Parallel variables...
Done.

          Area-Weighted Average
               Dynamic Pressure                (pascal)
------------------------------- --------------------
                         outlet            1.9999647

          Area-Weighted Average
                Static Pressure                (pascal)
------------------------------- --------------------
                         outlet          -0.32743197

          Area-Weighted Average
                 Total Pressure                (pascal)
------------------------------- --------------------
                         outlet            1.7434634
```

Figura 5.2-9. Reporte de presión.

Fuente: Autoría propia.

Con las consideraciones establecidas al inicio del análisis numérico tenemos una presión estática muy baja que es de 0.327 Pa, esto se podría mejorar variando el tiempo del ciclo de trabajo de la válvula de impulso si este fuera el caso, pero el objetivo de esta investigación está centrado justamente en analizar la mejora o aprovechamiento del ariete con el aumento del número de válvulas de impulso y para poder realizar esto se deberá analizar con los mismos ajustes los tres escenarios de estudio. Por ende, el rendimiento a considerar estará basado en la presión

5.3. Simulación de escenario *E2* (2 válvulas de impulso)

Al igual que el caso anterior en este punto se realiza el análisis numérico con dos válvulas de impulso estableciendo la válvula 1 como elemento estático en el cual el fluido se mantendrá estable como se puede observar en la **Figura *5.3-1***, el contorno de salida (outlet_v1) de esta válvula de deshecho será considerado como una pared fija (wall) permitiendo así que el fluido se llene en esta cavidad en un tiempo despreciable para el análisis, se alcanza una velocidad de 0.28 m/s.

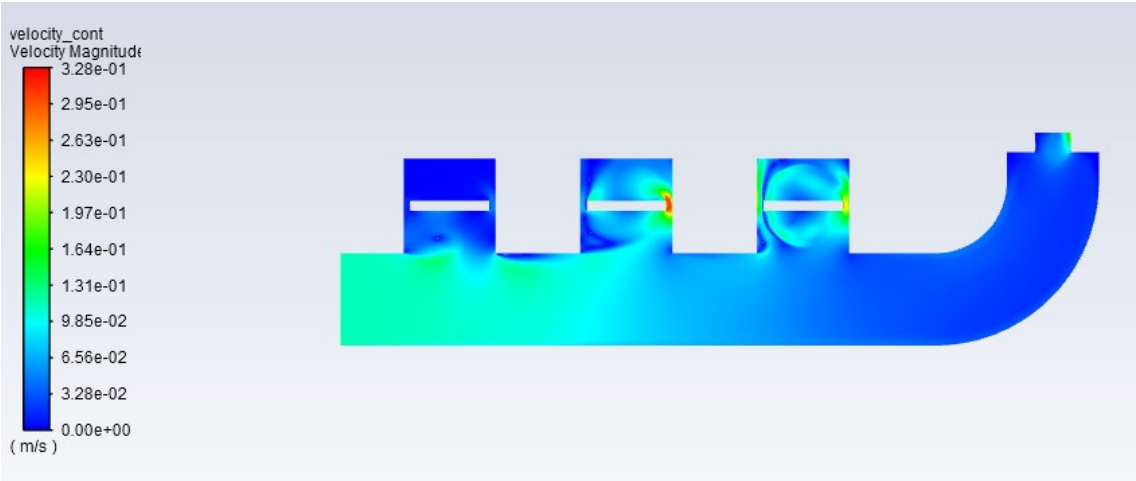


Figura 5.3-1. Contorno de velocidad, - E2 posición válvulas cerradas

Figura: Autoría propia.

En la **Figura *5.3-2*** se indica el contorno de velocidad en un tiempo de simulación de 2,5 segundos, permitiendo observar de manera clara el comportamiento del fluido dentro del contorno del ariete de análisis y presentando claramente una variación en la velocidad de salida en el punto de análisis con respecto al supuesto cuando la válvula se cierra, alcanzando una velocidad de 0.29 m/s.

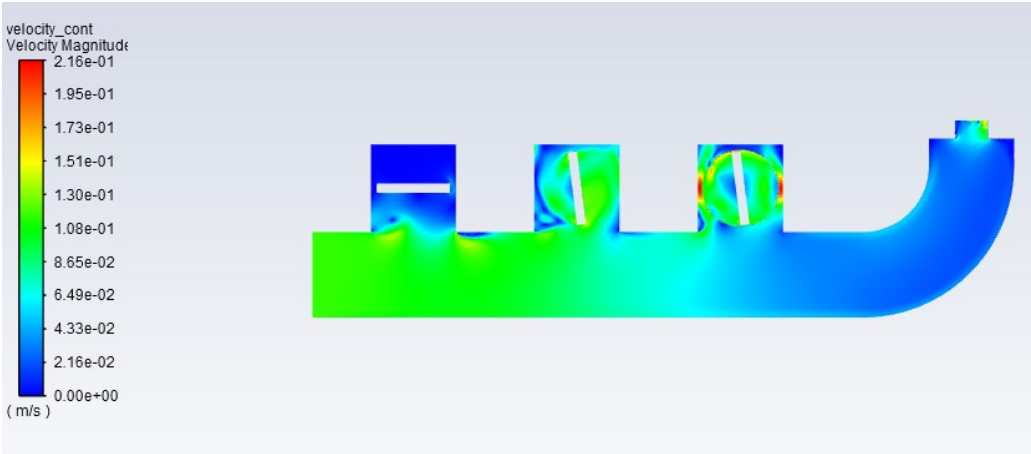


Figura 5.3-2. Contorno de velocidad, - E2 posición válvulas abiertas.

Fuente: Autoría propia.

En la **Figura *5.3-3***, se observa el contorno de presión del ariete hidráulico multipulsor con dos válvulas de impulso con el supuesto de válvula cerrada, en ella se puede percibir que la presión aumenta notablemente con respecto a la presión que se puede observar en la **Figura *5.3-4*** cuando las válvulas de impulso se encuentran abiertas, este análisis esta evaluado en un tiempo de simulación de 1 y 2,5 segundos respectivamente.

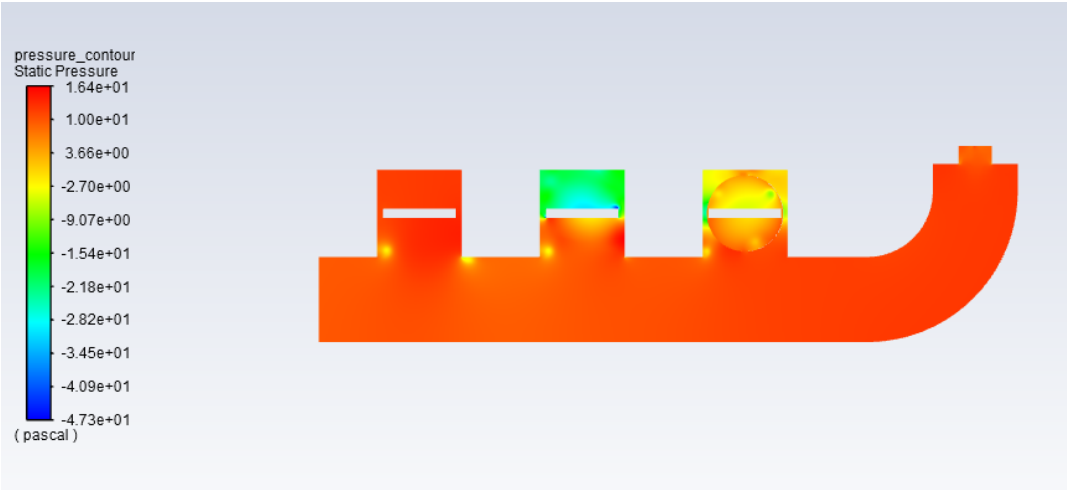


Figura 5.3-3. Contorno de presión, - E2 posición válvulas cerradas.

Fuente: Autoría propia.

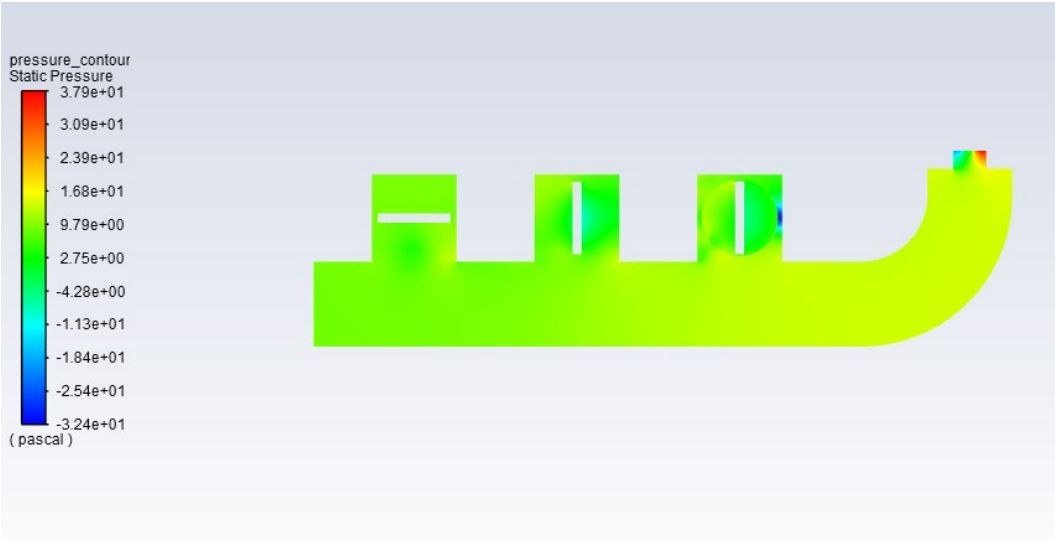


Figura 5.3-4. Contorno de presión, - E2 posición válvulas abiertas.

Fuente: Autoría propia.

A continuación, en la **Figura *5.3-5*** se puede evidenciar el reporte de convergencia del sistema de análisis con dos válvulas de impulso, siendo esto evaluado en la salida del caudal másico *(Mass Flow Rate)* en relación con el tiempo de flujo.

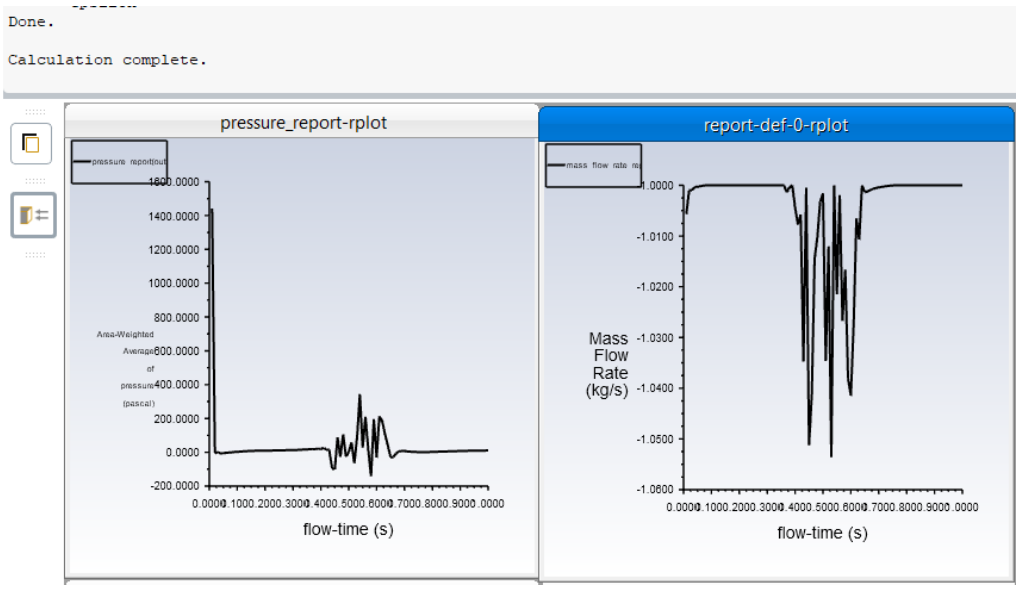


Figura 5.3-5. Reporte de convergencia de caudal másico.

Fuente: Autoría propia

De la misma manera, al igual que el primer escenario de análisis se puede observar en la **Figura *5.3-6*** una salida de caudal másico de 1 kg/s, por lo tanto, el aprovechameinto y el porcentaje de perdida o desperdicio de la bomba de arite sería similar. El cálculo del caudal volumetrico que nos proporciona el software se puede observar en la **Figura *5.3-7*** indicando

una cantidad de $0.001\frac{m^3}{s}$ y una presión estática de 10.631 Pa que se puede observar en la **Figura *5.3-8***, después de hacer un análisis de los tres escenarios se explicara las razones por las cuales se presentan estos datos.

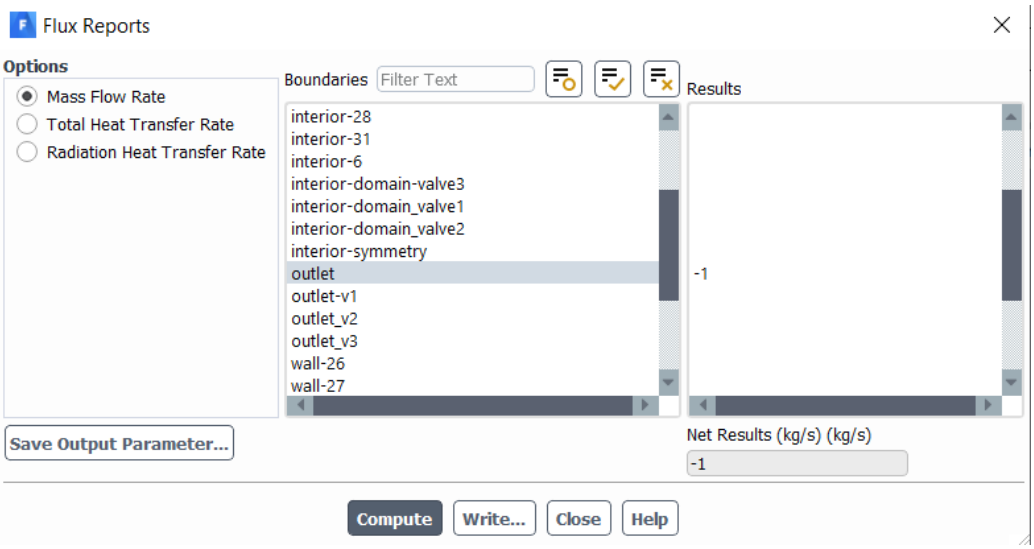


Figura 5.3-6. Reporte de caudal másico.

Fuente: Autoria Propia.

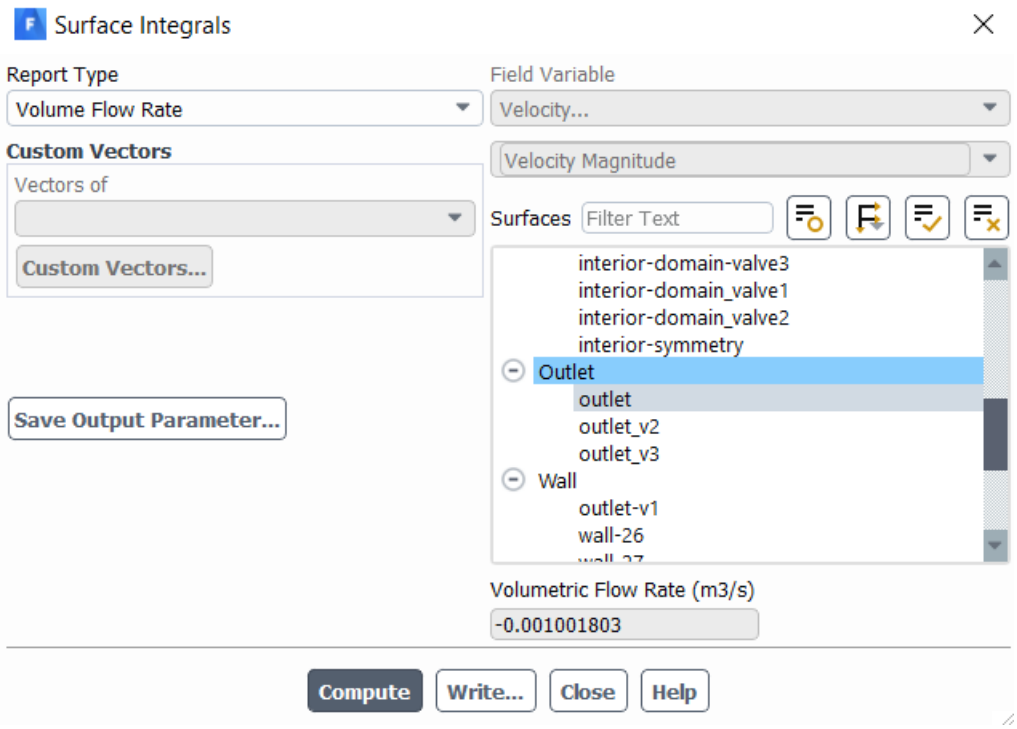


Figura 5.3-7. Reporte de caudal volumétrico.

Fuente: Autoría propia.

```
Parallel variables...
Done.

          Area-Weighted Average
               Dynamic Pressure                (pascal)
-------------------------------- --------------------
                          outlet            1.5269505

          Area-Weighted Average
                Static Pressure                (pascal)
-------------------------------- --------------------
                          outlet           10.631652

          Area-Weighted Average
                 Total Pressure                (pascal)
-------------------------------- --------------------
                          outlet            12.19803
```

Figura 5.3-8. Reporte de presión estática.

Fuente: Autoría propia.

5.4. Simulación de escenario *E3* (3 válvulas de impulso)

Para este caso al igual que los anteriores se indica principalmente un contorno de velocidad del fluido en dos posiciones de la válvula de impulso, en la **Figura *5.4-1*** se observa el avance del fluido 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 *5.4-2*** Se indica el contorno de velocidad después de haber transcurrido 2,5 segundos de simulación en el cual el supuesto de la válvula se encuentra en estado abierto, en el último tiempo se obtiene una velocidad 0.34 m/s.

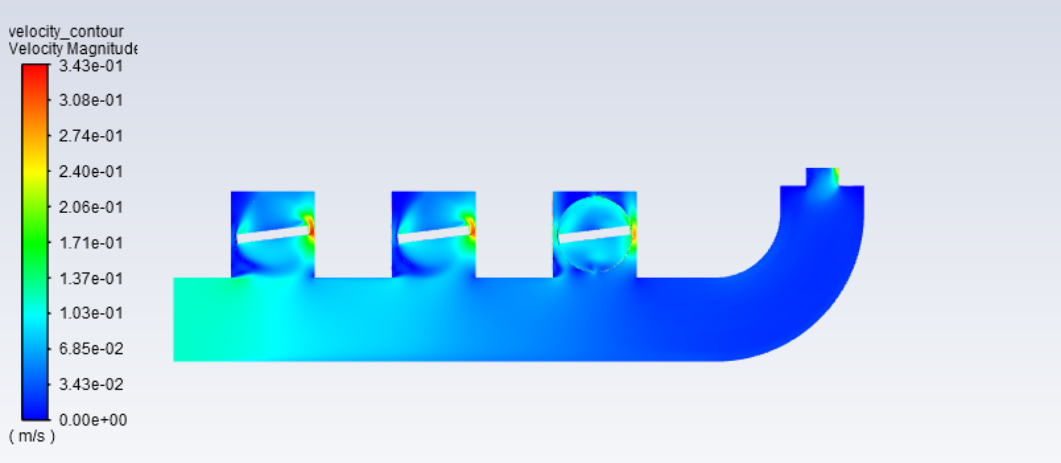


Figura 5.4-1: Contorno de velocidad, - E3 posición válvulas cerradas.

Fuente: Autoría propia

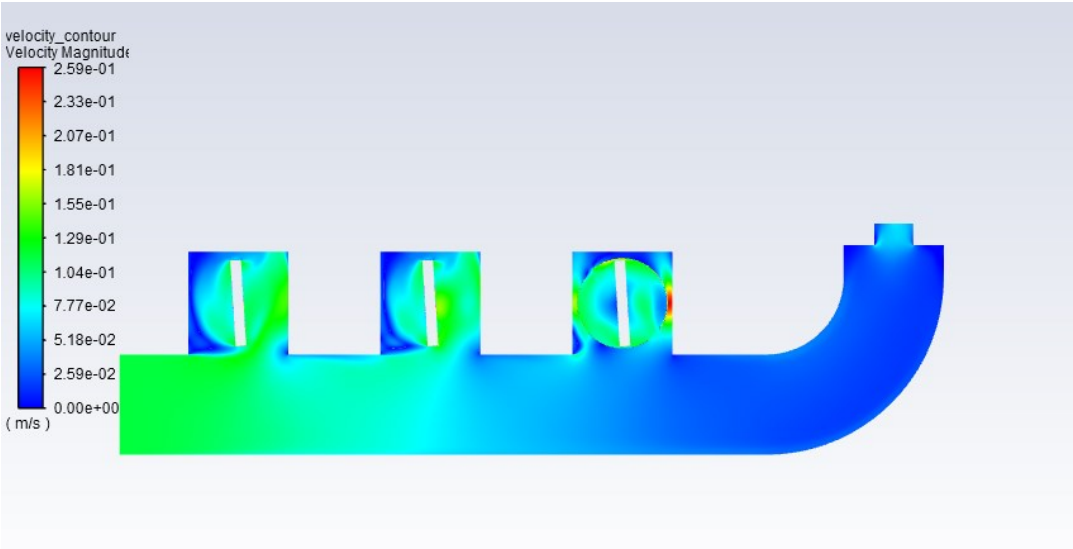


Figura 5.4-2: Contorno de velocidad, - E3 posición válvulas abiertas.

Fuente: Autoría propia.

Las **Figura** ***5.4-3*** y **Figura** ***5.4-4*** indican en este caso el contorno de simulación numérica basado en presión estática, en la cual se puede apreciar primeramente el estado de las válvulas de impulso como cerradas y en la siguiente figura se logra ver el contorno de presión con la válvula en estado abierto, estas presentaciones se dan en un tiempo de simulación de 1 y 2,5 segundos respectivamente.

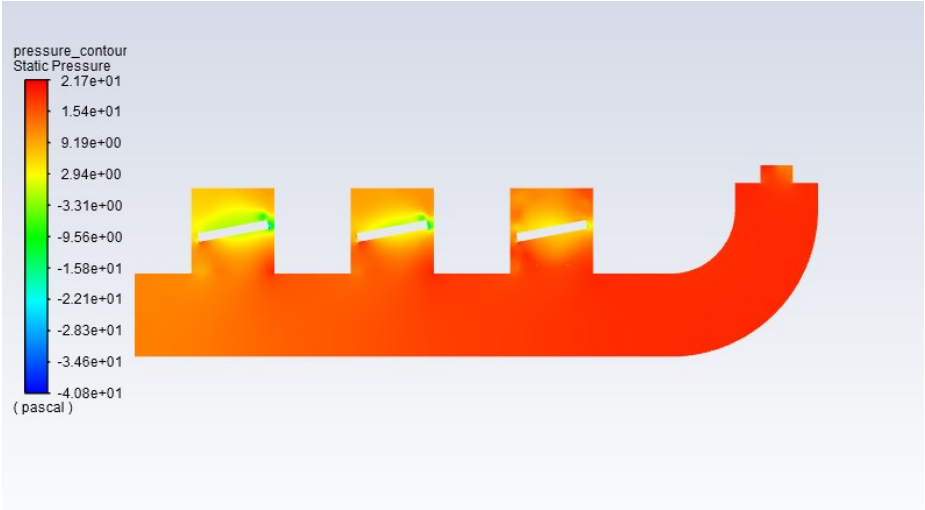


Figura 5.4-3: Contorno de presión, - E3 posición válvulas cerradas.

Fuente: Autoría propia

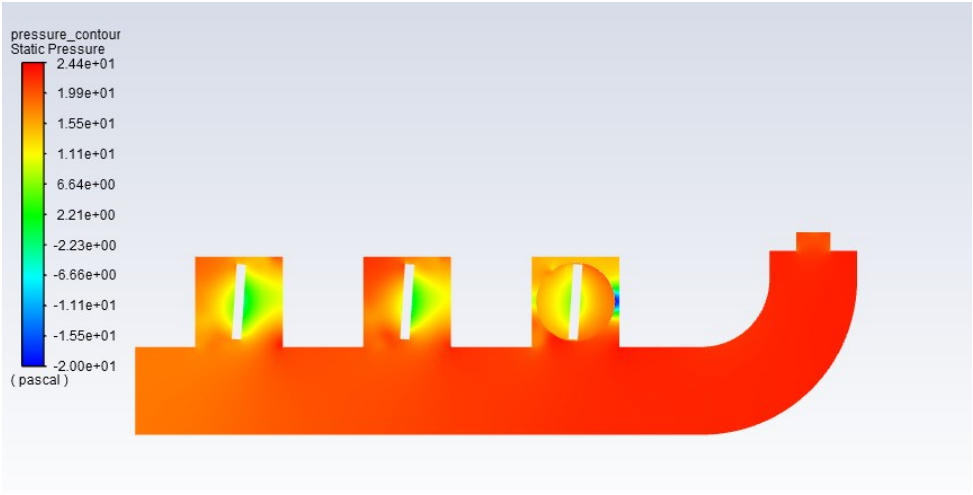


Figura 5.4-4: *Contorno de presión,* - E3 posición válvulas *abiertas.*

Fuente: Autoría propia.

La gráfica de convergencia del sistema se indica en la **Figura *5.4-5*** se tomó como variable de referencia el caudal másico en el contorno de entrada de la válvula de retención y la presión en el mismo punto, en esta gráfica se puede observar que el sistema converge alrededor de las 3224 iteraciones para el caudal másico y por ende la gráfica tanto del caudal másico de salida como la presión se detiene, pero el sistema seguirá iterando las veces que se establecieron inicialmente.

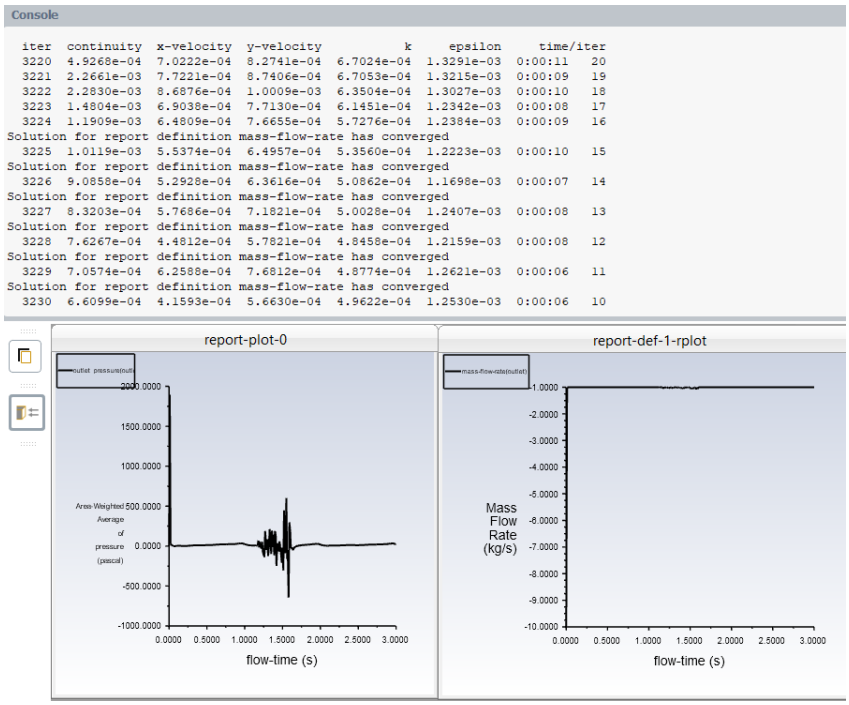


Figura 5.4-5. Reporte de convergencia de caudal másico.

Fuente: Autoría propia.

En la **Figura *5.4-6*** y **Figura *5.4-7*** se puede apreciar que la cantidad de caudal másico es de 0.99 $\frac{kg}{s}$ y caudal volumétrico 0.001 $\frac{m^3}{s}$ respectivamente, observando en esta primera las diferencias de caudal másico en cada una de las salidas, cabe recalcar que el contorno de desperdicio de las válvulas fue considerado como tal.

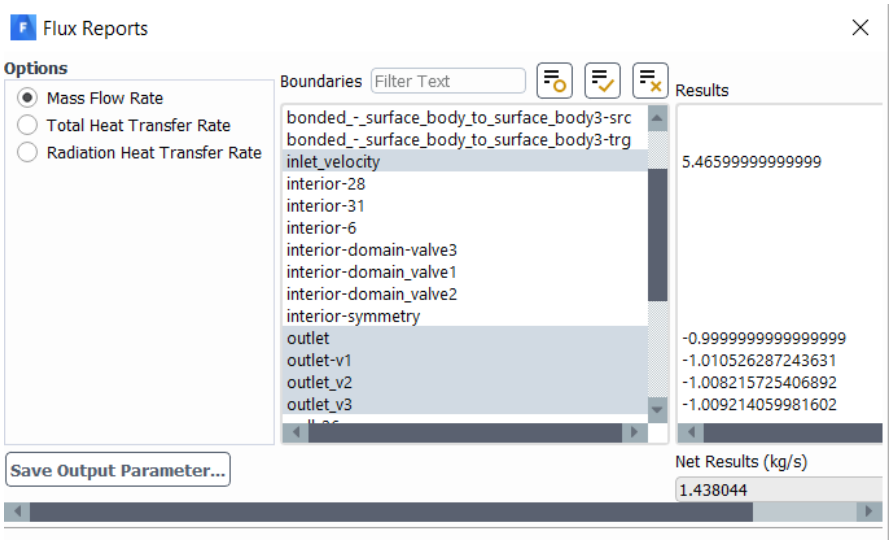


Figura 5.4-6: Reporte de caudal másico.

Fuente: Autoría propia.

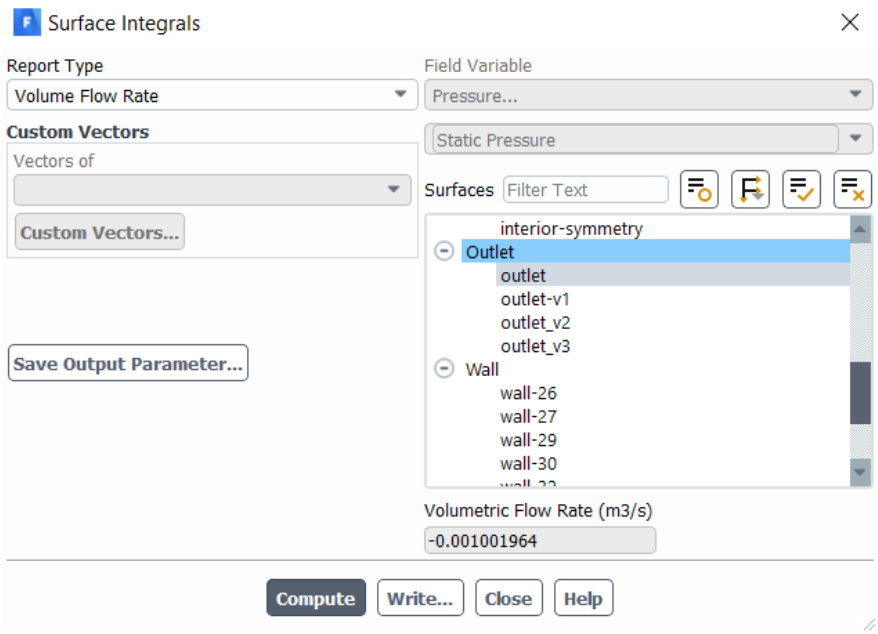


Figura 5.4-7. Reporte de caudal volumétrico

Fuente: Autoría propia.

La presión estática en el contorno de análisis principal (outlet) se indica en la **Figura *5.4-8***, siendo esta la presión mayor que se ha logrado obtener con el modelamiento numérico del ariete con tres válvulas de impulso.

```
Parallel variables...
Done.

           Area-Weighted Average
                Dynamic Pressure                (pascal)
-------------------------------- --------------------
                          outlet            1.5165597

           Area-Weighted Average
                 Static Pressure                (pascal)
-------------------------------- --------------------
                          outlet           22.194193

           Area-Weighted Average
                  Total Pressure                (pascal)
-------------------------------- --------------------
                          outlet           23.749353
```

Figura 5.4-8. Reporte de presión.

Fuente: Autoría propia.

5.5. Análisis de resultados de los escenarios de simulación.

Los resultados anteriormente presentados, como ya se explicó están evaluados en un tiempo de simulación y condiciones de estudio (condiciones de entrada) similar en los tres escenarios. Como era de esperar los resultados tienden a ser similares con respecto a los datos de salida tales como el caudal másico y el caudal volumétrico en la **Tabla *5.5-1*** se hace un resumen de los datos obtenidos para los tres escenarios de simulación.

Tabla 5.5-1. *Datos obtenidos del proceso de simulación de escenarios.*

Escenario	Caudal másico [kg/s]	Caudal volumétrico [m^3/s]	Presión [Pa]		
			Estática	Dinámica	Total
E1	1	0.001001	-0.327	1.999	1.743
E2	1	0.001001	10.631	1.526	12.198
E3	0.999	0.001001	22.194	1.516	23.749

Nota: Los datos obtenidos del proceso de simulación. Fuente: Autoría propia

Como se puede evidenciar en la **Tabla *5.5-1*** anterior la cantidad que varía en cada uno de los casos de análisis es el de la presión. Esto debido a que con el incremento de las válvulas de impulso el sistema generara más presión en su salida, pero no varía su salida de cantidad de flujo, hay que tener en cuenta que en el caso de un análisis práctico si bien es cierto el número de ciclos de las válvulas de impulso disminuyen con el incremento de estas válvulas, y para este caso de estudio no se evaluó el sistema tomando esas consideraciones.

5.6. Eficiencia de la bomba de ariete

Según Jara Cobos et al., (2011), la eficiencia de una bomba de ariete por definición está dada por la ecuación (9), que relaciona entre la potencia útil entregada (nu) y la potencia recibida (absorbida) del agua de alimentación (nb).

$$\eta = \frac{nu}{nb} \tag{9}$$

Para el cálculo de potencia útil entregada en la descarga (nu) se utilizará la siguiente ecuación:

$$nu = qb * Ps * g * \rho \tag{10}$$

Donde:

nu = Potencia útil entregada en la descarga

qb = caudal de bombeo en m^3/s

Ps = Presión de salida generada por el ariete

g= aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

ρ = densidad del agua (1000) kg/m^3

De igual manera, para calcular la potencia absorbida del agua de alimentación (nb) se usará la fórmula:

$$nb = Q * Pi * g * \rho \tag{11}$$

Donde:

nb = potencia absorbida del agua de alimentación

pi = presión en el ingreso del ariete

Q = caudal de entrada al ariete hidráulico

En la **Tabla *5.6-1*** y en la **Figura *5.6-1*** se expresa la eficiencia del ariete hidráulico multipulsor, para los tres escenarios de análisis.

Tabla 5.6-1. *Porcentajes de eficiencia del ariete hidráulico multipulsor.*

Escenario	**Caudal volumétrico de entrada [m³/s]**	**Caudal volumétrico de salida [m³/s]**	**Presión de entrada [Pa]**	**Presión de salida [Pa]**	**Eficiencia [%]**
E1	0.00546	0.001001	17.042	0.327	0.355
E2	0.00546	0.001001	17.042	10.631	11.55
E3	0.00546	0.001001	17.042	22.194	24.11

Nota: el porcentaje de eficiencia presentada en la tabla 4.6-1, está basado en el análisis de presión en la salida. Fuente: Autoría propia

En la **Figura *5.6-1***, se puede evidenciar que la eficiencia del ariete hidráulico con tres válvulas de impulso (E3) crece en un más del 20 % con respecto al ariete que trabaja con una sola válvula de impulso (E1), llegando a ser este el que mayor eficiencia genera en su desarrollo, incluso tiene una gran ventaja en cuanto a la eficiencia con respecto al ariete que trabaja con dos válvulas de impulso.

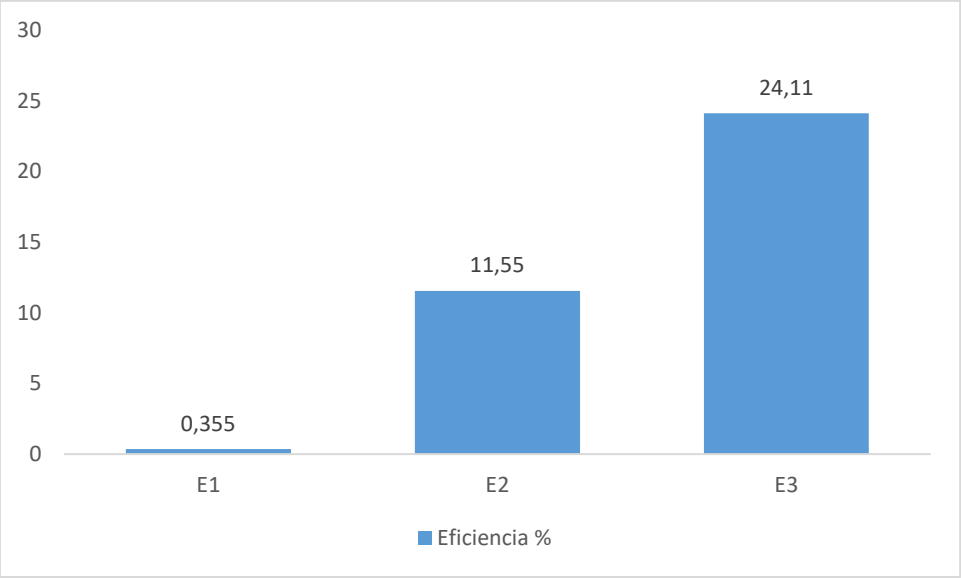


Figura 5.6-1. Eficiencia del ariete hidráulico multipulsor para escenarios *E1*, *E2* y *E3*

Fuente: Autoría propia.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado el estudio mediante simulación del efecto hidrodinámico del número de válvulas de impulso en las características operativas de una bomba de ariete hidráulico, mediante simulaciones numéricas bidimensional para tres escenarios de análisis utilizando el paquete computacional Ansys Fluent, logrando analizar y validar el sistema para cada uno de los escenarios. Las conclusiones están basadas en los criterios de análisis planteados en su momento.

- Fue posible estudiar mediante simulación el efecto del número de válvulas de impulso en la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico.
- A partir de la revisión documental se logró entender el principio de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico llegando a conocer la estructura, su funcionamiento, y sus principales parámetros de operación, además de sus partes constitutivas.
- Para cumplir con el objetivo de este proyecto fue fundamental explorar los modelos numéricos para la simulación de flujos, de esta manera optando por el modelo de turbulencia estando este centrado en la resolución de ecuaciones de Navier – Stokes.
- El modelo de turbulencia K –épsilon represento en buena medida el efecto del golpe de ariete llegando a arrojar resultados coherentes en la simulación.
- 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.
- Mediante la simulación se logró evidenciar el incremento de la presión generada en el ariete debido al incremento de las válvulas de impulso, esto es muy satisfactorio ya que esta presión es la que hace el trabajo de impulsar el agua una altura determinada.

- De acuerdo a los resultados obtenidos el porcentaje de eficiencia crece a medida que se incrementa el número de válvulas de impulso, pudiendo así afirmar que el análisis que mayor eficiencia brinda es el que trabaja con tres válvulas de impulso (E3), llegando a ofrecer hasta un 20 % de eficiencia.

7. Recomendaciones

Con el fin de esclarecer el tema de trabajo que se ejecutará, se recomienda realizar un análisis investigativo y poder detectar posibles avances tecnológicos, y de esta manera se establecerá objetivos un tanto más real para analizar.

Para realizar un análisis matemático CFD es indispensable tener presente los conocimientos de ingeniería tanto teóricos y como prácticos, ya que, este proceso al no estar sujeto a un previo análisis requerirá tomar decisiones sobre los diferentes parámetros dependiendo del tipo de modelo que empleé.

Capacitaciones por parte de la universidad Politécnica Salesiana a los estudiantes de ingenierías sobre modelamientos CFD.

8. Trabajo futuro

Realizar un análisis CFD del ariete hidráulico teniendo en cuenta características de análisis que se logren ejecutar en el software de simulación.

Analizar el ariete hidráulico con métodos CFD incluyendo UDFs para controlar variables dependientes del tiempo en la salida en las válvulas de impulso.

Analizar el dominio del ariete hidráulico con métodos CFD variando la cantidad de golpes por segundo de las válvulas de impulso.

9. Referencias

ANSYS, “Ansys Fluent 2019 R1: Theory guide”, [Online]. Available: https://go-pdf.online/out/2BE079D/ ansys-fluent-theory-guide.pdf, consultado el 08 de Abril de 2021.Acitores-Martínez, F. (2012). *Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete*. Recuperado de https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/14685

Amari, J. (2013). *Diseño y construcción de un ariete de doble bombeo, para el centro de investigaciones de energías renovables y eficiencia energética.* Recuperado de https://dspace.unl.edu.ec//handle/123456789/12081

Barney, E., Kerkhoff, A., Corrado, L., & Barbaro, M. (2011). *BOMBA DE ARIETE. MANEJAR RECURSOS HIDRICOS DE MISIONES CON TECNOLOGIA ADECUADA.* 8.

Bertinat, P., Chemes, J., & Micheletti, I. (2012). Bomba de Ariete Hidráulico. Recuperado 19 de enero de 2022, de Google Docs website: https://drive.google.com/file/d/0B8FaYsQx_P33RzNPMk4tVk0xSTA/view?pre&usp=embed_facebook

De las Heras, S. (2011). *Fluidos, Bombas e Instalaciones Hidráulicas*. Recuperado de https://www.libreriaingeniero.com/2020/10/fluidos-bombas-e-instalaciones-hidraulicas-salvador-de-las-heras.html

Fernandez Chavez, C. S., & Salas Rimarachin, M. (2018). Diseño del sistema de abastecimiento e agua utilizando la bomba de ariete en la localidad Limabamba, Soritor, Moyobamba, 2018. *Universidad César vallejo*. Recuperado de http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/31626

Galarza, R. (2013). *Estudio de factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia*. Recuperado de https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/3714

Guerrero, J. M. R., & Gutiérrez, L. L. (2014). El ariete hidráulico. Proyecto e instalación en Ntongui (Angola). *Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, *0*(1), 224-237.

Guevara-Luna, M. (2015). *Diseño de un equipo de recuperación de líquidos de gas natural empleando CFD*.

Hunt, J. C. R., Tampieri, F., Weng, W. S., & Carruthers, D. J. (1991). Air flow and turbulence over complex terrain: A colloquium and a computational workshop. *Journal of Fluid Mechanics*, *227*, 667-688.

Jakeman, A. J., Letcher, R. A., & Norton, J. P. (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, *21*(5), 602-614. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.01.004

Jara Cobos, N., Campoverde Ochoa, E., & Pizarro Jara, D. (2011). Emplazamiento, implementación, pruebas de funcionamiento y propuestas de mejora de los sistemas de bombeo mediante rueda hidráulica y ariete multipulsor para el abastecimiento de agua para irrigación en la localidad del campus Juan Lunardi-Yumacay-Paute -Azuay. *Ingenius*, (6), 51-62. https://doi.org/10.17163/ings.n6.2011.06

Lampoglia, T. C., Agüero Pittman, R., Barrios, C., & Torres, R. (Eds.). (2014). *Guía de orientacion en saneamiento básico para alcaldías de municipio rurales y pequeñas comunidades*. Lima: OPS.

Malca-Abanto, J. R., & Quiroz-Gamboa, R. A. (2016). Eficiencia de un sistema de suministro de agua por impulsion utilizando bombas de ariete hidráulico con válvulas en serie y en paralelo. *Universidad Privada del Norte*. Recuperado de https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/10256

Mataix, C. (2004). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Marcombo.

Montecinos, A., & Gallardo, L. (2019). Los Secretos Del Ariete Hidráulico | PDF | Bomba | Agua. Recuperado 19 de enero de 2022, de Scribd website: https://es.scribd.com/document/269985441/los-Secretos-Del-Ariete-Hidraulico

Ollague, H., Azanza, H., & Reinoso, F. (2014). *Estudio y evaluacion de los parámetros de operación del proyecto eolico Villonaco de la provincia de Loja-Ecuador*.

Pilco Mora, L. E., & Sandoval Fernández, D. A. (2017). *Análisis para el incremento de la capacidad de una bomba de ariete hasta una altura de 50 metros.* Recuperado de http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13625

Quispe, J. B. A. (2016). Evaluacion del rendimiento del Ariete Hidráulico BAH-1.1/2 variando la longitud de la tubería de alimentación y condiciones de operación de la válvula de impulso. *Anales Científicos*, *77*(2), 155-165.

Reinoso Avecillas, F., Jara Cobos, N., Gomez del Pino, P., & Nieto Londoño, C. (2016). *Caracterizacion del flujo de aire en colinas para el emplazamiento de parques eolicos*. Recuperado de http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13802

Reinoso, F., Bustamante, A., & Quezada, M. (2009). *Diseño de un prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor de abastecimiento de agua para irrigación*. Recuperado de http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10917

Reinoso-Avecillas, F. (2021). *Simulacion y análisis del flujo de aire en terrenos complejos* (Tesis de grado). Universidad nacional de educacion a distancia.

Reza, F.-A., Babak, L., & Alireza, K. (2015). *Determine The Efficiency of Hydraulic Ram-Pumps*. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1461.6487

Rivadeneira Carlosama, S. X., & Silva Espinosa, L. F. (2013). *Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento*. Recuperado de http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/5989

Ruiz Canales, A., & Molina Martínez, J. M. M. (2010). *Automatizacion y telecontrol de sistemas de riego*. Marcombo. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=510055

Sheikh, S., Handa, C. C., & Ninawe, A. P. (2013). *DESIGN METHODOLOGY FOR HYDRAULIC RAM PUMP (HYDRAM)*. 6.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed). Harlow, England ; New York: Pearson Education Ltd.

Watt, S. (1975). *A Manual On The Hydraulic Ram For Pumping Water S. B. Watt*. Recuperado de http://archive.org/details/AManualOnTheHydraulicRamForPumpingWaterS.B.Watt

Zachár, A. (2010). Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *19-20*(53), 3928-3939. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.011

10. Anexos

10.1. Anexo 1. Características de la calidad de la malla

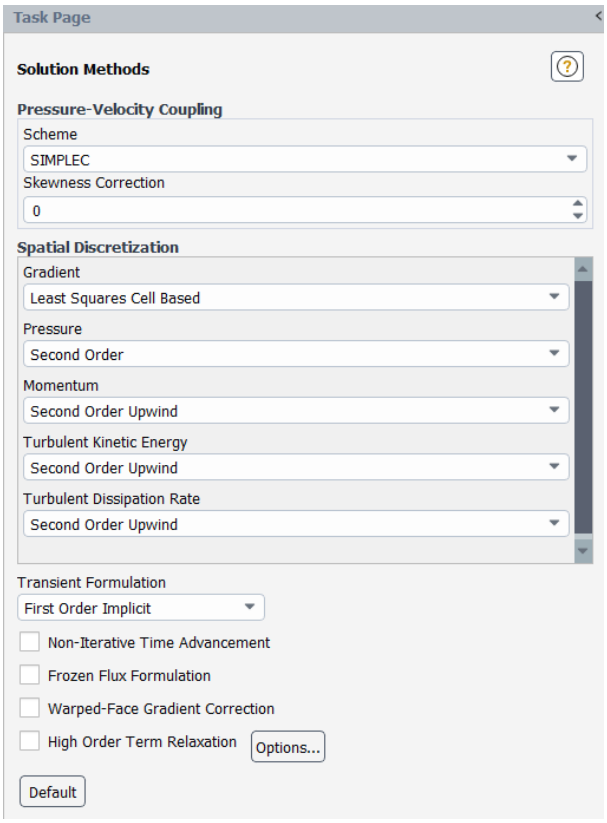
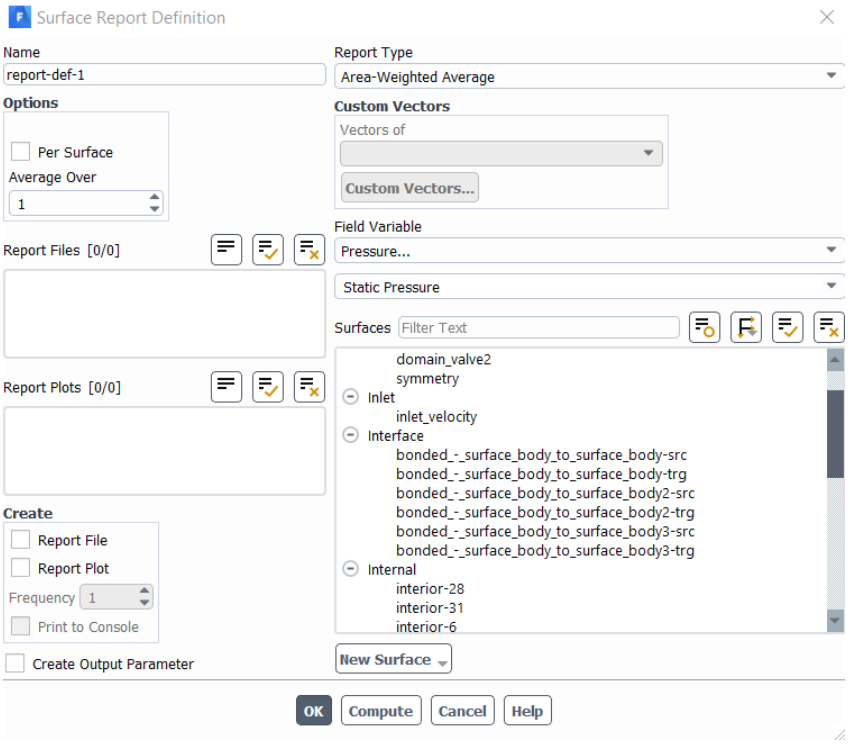
```
 Domain Extents:
   x-coordinate: min (m) = -1.452000e-01, max (m) = 2.401000e-01
   y-coordinate: min (m) = -7.080000e-02, max (m) = 3.710000e-02
 Volume statistics:
   minimum volume (m3): 3.779595e-09
   maximum volume (m3): 7.274651e-08
     total volume (m3): 2.554956e-02
 Face area statistics:
   minimum face area (m2): 2.496416e-05
   maximum face area (m2): 3.795595e-04
 Checking mesh.....................................
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality =  4.01731e-01 cell 81035 on zone 7 (ID: 685618 on
partition: 3) at location ( 1.86558e-01 -3.16363e-02)
(To improve Orthogonal quality , use "Inverse Orthogonal Quality" in Fluent
Meshing,
 where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal Quality)

Maximum Aspect Ratio =  1.04881e+01 cell 1548 on zone 7 (ID: 685388 on
partition: 3) at location ( 2.25789e-01  2.71952e-02)
```

10.2. Anexo 2. Características del método de solución.



10.3. Anexo 3. Características del reporte de simulación.