

**MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO
DEL GOLPE DE ARIETE EN UNA ALMENARA Y EN UNA CAMARA DE
QUIEBRE DE PRESIÓN**

DAVID CAMILO BAQUERO ALBA

CODIGO 506195

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C

2019

**MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO
DEL GOLPE DE ARIETE EN UNA ALMENARA Y EN UNA CAMARA DE
QUIEBRE DE PRESIÓN**

DAVID CAMILO BAQUERO ALBA

CODIGO 506195

TRABAJO DE GRADO MODALIDAD INVESTIGACIÓN

Asesor

DIEGO ALEJANDRO PULGARIN MONTOYA

Ingeniero Sanitario

Msc Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C

2019



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por permitirme dar la oportunidad de vivir y tener la fuerza y carácter suficiente en cada decisión y paso que doy a mi vida, por fortalecer mi fe en él frente a las adversidades que se me presentan y por haberme acompañado en mi proceso durante todo mi periodo académico y formación como profesional.

Agradezco a mis padres y hermano, por su amor brindado y apoyo incondicional, además de los consejos y ayuda frente a los problemas y difíciles situaciones. A mis padres por apoyarme y ayudarme con los recursos necesarios para poder estudiar y culminar mis estudios.

Agradezco al Ingeniero Diego Alejandro Pulgarin, quien me oriento y suministró la ayuda y conocimientos necesarios para llevar a cabo este documento y quien me sigue dando apoyo para convertirme en un buen ingeniero. Agradezco a todos los maestros y compañeros que me acompañaron en este proceso y que con sus enseñanzas y conocimiento contribuyeron a mi formación como profesional durante estos 5 años de formación. De todos y cada una de las personas que pasaron por mi vida y ayudaron a mi proceso me llevo un cariño especial.

David Camilo Baquero Alba

CONTENIDO

INTRODUCCION	9
1. GENERALIDADES	8
1.1 ANTECEDENTES	8
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA	10
1.3 OBJETIVOS	11
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4 JUSTIFICACIÓN	11
1.5 MARCO TEORICO	12
1.5.1 GOLPE DE ARIETE	12
1.5.2 ELEMENTOS DE CONTROL	13
1.5.3 METODOS NUMERICOS	19
1.6 MARCO CONCEPTUAL	20
1.6.1 ECUACION PARA EL PERIODO DE LA ONDA DE PRESION	20
1.6.2 CALCULO DE LA CELERIDAD DE LA ONDA DE PRESION	20
1.6.3 TIPOS DE CIERRE DE LAS VALVULAS	22
1.6.4 SOFTWARE PARA CÁLCULO DE TRANSITORIOS (ALLIEVI)	23
1.7 ESTADO DEL ARTE	25
1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES	27
2. METODOLOGIA	28
2.1 ENSAYOS Y PRÁCTICAS DE LABORATORIO	29
2.1.1 ENSAYO – MONTAJE ALMENARA	29
2.1.2 ENSAYO – MONTAJE CAMARA DE QUIEBRE DE PRESION	31
2.2 CALCULO DE PERDIDAS EN EL SISTEMA	34
2.3 METODOS Y ECUACIONES PARA EL CALCULO DE Z MAX	34
2.3.1 METODOS PARA LA ALMENARA	34
2.4 MODELACION COMPUTACIONAL – SOFTWARE ALLIEVI	36
2.4.1 SIMULACIÓN DEL MONTAJE – ALMENARA	38
2.4.2 SIMULACIÓN DEL MONTAJE – CÁMARA DE AIRE	42
2.5 COMPARACIÓN Y COMPROBACIÓN	47
2.5.1 ALMENARA	47
2.5.2 CÁMARA DE AIRE	48
3. RESULTADOS	48

3.1	MEDICIONES EN CAMPO DE LOS MODELOS FISICOS.....	48
3.1.1	MEDICIONES EN CAMPO DEL MODELO FISICO – ALMENARA	48
3.1.2	MEDICIONES EN CAMPO DEL MODELO FISICO – CÁMARA DE AIRE.....	51
3.2	CALCULO DE LAS PERDIDAS EN EL SISTEMA	64
3.3	RESULTADOS DEL METODO NUMERO Y TEORICO DE ARMIN SCHOKLITSCH A PARTIR DE ECUACIONES	65
3.4	RESULTADOS DE LA MODELACION COMPUTACIONAL EN EL SOFTWARE ALLIEVI	67
3.4.1	RESULTADOS DE LA MODELACION – MONTAJE ALMENARA.....	67
3.4.2	RESULTADOS DE LA MODELACION – MONTAJE CÁMARA DE AIRE	73
3.5	RESULTADOS DE LA COMPARACION Y COMPROBACION	75
3.5.1	COMPARACION Y COMPROBACION – MONTAJE ALMENARA.....	75
3.5.2	COMPARACION Y COMPROBACION – MONTAJE CÁMARA DE AIRE.....	77
4.	CONCLUSIONES.....	81
5.	RECOMENDACIONES	82
6.	BIBLIOGRAFIA	83
	ANEXOS.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cierre repentino de la válvula	13
Figura 2. Diagrama del sistema con una almenara en una planta hidroeléctrica	14
Figura 3. Tipos de almenaras.....	15
Figura 4. Cámara de aire con orificio diferencial	16
Figura 5. Válvula de seguridad o descarga de sobrepresión	18
Figura 6. Válvula de alivio o supresor de sobretensión.....	18
Figura 7. Diagrama L,t con las curvas generadas.....	19
Figura 8. Diagrama L,t condiciones de borde. Alturas y velocidades posteriores	20
Figura 9. Tanque de aforo de caudal	29
Figura 10. Válvula de regulación (válvula de bola).....	30
Figura 11. Montaje experimental - almenara.....	30
Figura 12. Montaje experimental – almenara.....	31
Figura 13. Cámaras de aire.....	31
Figura 14. Tanque de aforo para caudal	32
Figura 15. Condición inicial – sin cámara de aire.....	33
Figura 16. Ensayo de cámara de quiebre de presión.....	33
Figura 17. Opciones de cálculo.....	36
Figura 18. Configuración de los cálculos	37
Figura 19. Elementos del programa	37
Figura 20. Dibujo.....	38
Figura 21. Cotas en los nodos	38
Figura 22. Parámetros del reservorio.....	39
Figura 23. Coeficientes de pérdidas de la almenara	39
Figura 24. Cálculo de la celeridad en las tuberías	40
Figura 25. Parámetros de las tuberías	40
Figura 26. Apertura de las válvulas de regulación	41
Figura 27. Parámetros de las válvulas de regulación.....	41
Figura 28. Grafica de cambios de alturas – Zmax y Zmin.....	42
Figura 29. Dibujo cámara de aire	43
Figura 30. Parámetros del reservorio.....	43
Figura 31. Coeficientes de pérdidas de la cámara de aire	44
Figura 32. Parámetros para la cámara de quiebre de presión	44
Figura 33. Cálculo de la celeridad en las tuberías	45
Figura 34. Parámetros de las tuberías	45
Figura 35. Apertura de las válvulas de regulación	46
Figura 36. Parámetros de las válvulas de regulación.....	46
Figura 37. Resumen y graficas de la cámara de aire.....	47
Figura 38. Onda de sobrepresión- Z max vs tiempo	50
Figura 39. Onda de sobrepresión- Z max vs tiempo	50

Figura 40. Onda de sobrepresión- Z max vs tiempo	51
Figura 41. Cámara 1 - 0,162 l/s.....	52
Figura 42. Cámara 1 - 0,303 l/s.....	53
Figura 43. Cámara 1- 0,719 l/s.....	53
Figura 44. Cámara 1 - 0,791 l/s.....	53
Figura 45. Cámara 1 - 0,914 l/s.....	54
Figura 46. Cámara 1 - 1,079 l/s.....	54
Figura 47. Cámara 2 - 0,162 l/s.....	55
Figura 48. Cámara 2 - 0,303 l/s.....	55
Figura 49. Cámara 2 - 0,719 l/s.....	55
Figura 50. Cámara 2 - 0,791 l/s.....	56
Figura 51. Cámara 2 - 0,914 l/s.....	56
Figura 52. Cámara 2 - 1,078 l/s.....	56
Figura 53. Cámara 3 - 0,162 l/s.....	57
Figura 54. Cámara 3 - 0,303 l/s.....	57
Figura 55. Cámara 3 - 0,719 l/s.....	58
Figura 56. Cámara 3 - 0,791 l/s.....	58
Figura 57. Cámara 3 - 0,914 l/s.....	58
Figura 58. Cámara 3 - 1,078 l/s.....	59
Figura 59. Cámara 4 - 0,162 l/s.....	59
Figura 60. Cámara 4 - 0,303 l/s.....	60
Figura 61. Cámara 4 - 0,719 l/s.....	60
Figura 62. Cámara 4 - 0,791 l/s.....	60
Figura 63. Cámara 4 - 0,914 l/s.....	61
Figura 64. Cámara 4 - 1,078 l/s.....	61
Figura 65. Cámara 5 - 0,612 l/s.....	62
Figura 66. Cámara 5 - 0,303 l/s.....	62
Figura 67. Cámara 5 - 0,719 l/s.....	62
Figura 68. Cámara 5 - 0,791 l/s.....	63
Figura 69. Cámara 5 - 0,914 l/s.....	63
Figura 70. Cámara 5 - 1,078 l/s.....	63
Figura 71. Onda de sobrepresión - caudal 0,38 l/s	69
Figura 72. Onda de sobrepresión -caudal 0,35 l/s	71
Figura 73. Onda de sobrepresión - caudal 0,20 l/s	72
Figura 74. Zmax (m) vs Tiempo (s)	75
Figura 75. Transiente Allievi vs Modelo físico	76
Figura 76. Graficas P max vs Longitudes de cámaras de aire.....	78
Figura 77. Graficas P max vs Caudal.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Modulo de elasticidad de los materiales de conducción	22
Tabla 2. Datos registrados - altura (cm) vs tiempo (s)	49
Tabla 3. Cámaras de aire	51
Tabla 4. Caudales de ensayo	52
Tabla 5. Datos registrados cámara de aire N°1	52
Tabla 6. Datos registrados cámara de aire N°2	54
Tabla 7. Datos registrados cámara de aire N°3	57
Tabla 8. Datos registrados cámara de aire N°4	59
Tabla 9. Datos registrados cámara de aire N°5	61
Tabla 10. Valores del sistema ensayado	65
Tabla 11. Tabla de resumen método teórico	66
Tabla 12. Presión en los nodos – caudal 0,38 l/s	67
Tabla 13. Caudal en las tuberías	67
Tabla 14. Nivel de flujo en la almenara - caudal 0,38 l/s	68
Tabla 15. Apertura de válvulas - caudal 0,38 l/s	68
Tabla 16. Zmax y nivel estático - caudal 0,38 l/s	68
Tabla 17. Presión en los nodos - caudal 0,35 l/s	69
Tabla 18. Caudal en las tuberías	70
Tabla 19. Nivel de flujo en la almenara - caudal 0,35 l/s	70
Tabla 20. Apertura de las válvulas - caudal 0,35 l/s	70
Tabla 21. Z max y nivel estático - caudal 0,35 l/s	70
Tabla 22. Presión en los nodos - caudal 0,20 l/s	71
Tabla 23. Caudal en las tuberías	71
Tabla 24. Nivel de flujo en la almenara - caudal 0,20 l/s	72
Tabla 25. Apertura de las válvulas - caudal 0,20 l/s	72
Tabla 26. Zmax y nivel estático - caudal 0,20 l/s	72
Tabla 27. Presión en los nodos	73
Tabla 28. Caudal en las tuberías	73
Tabla 29. Nivel de flujo en la cámara de aire	74
Tabla 30. Apertura de la válvula	74
Tabla 31. Calculo del transitorio - Zmax y nivel estático	74
Tabla 32. Comparacion y comprobación de los métodos aplicados	75
Tabla 33. Datos medidos en campo – mismo caudal diferente longitud de cámara de aire	77
Tabla 34. Datos medidos en campo – misma longitud de cámara de aire, diferente caudal.	79

INTRODUCCION

En relación a los daños que se presentan en las tuberías y demás sistemas hidráulicos debidos a las maniobras bruscas de las aperturas de válvulas u otro dispositivo que permita la regulación de flujo, se reconoce la importancia de hablar de diversos elementos de control que permitan contrarrestar estos daños, que son causados por los cambios repentinos de presión dentro de un sistema, a este fenómeno se le conoce como golpe de ariete, el cual consiste en la generación de una sobrepresión ocasionada por el cierre o apertura brusca de una válvula. En este documento trata, de la implementación de dos sistemas de control, en primera instancia se habla de la “chimenea de equilibrio o almenara” y posteriormente se muestra a las “cámaras de aire”.

Este trabajo de investigación responde a la necesidad de analizar el golpe de ariete y el fenómeno transiente, el cómo se mitiga de una forma más eficiente, de esta manera, se hace una comparación entre el fenómeno de estudio, en un sistema de la vida real, con unos datos experimentales y los que se obtienen por medio de una simulación en un software y el cómo se comporta en estos casos. Dicho trabajo, se desarrolla en tres fases, las cuales son: procedimiento experimental, simulación en el software y comparación y comprobación.

La fase de procedimiento experimental consiste en la mecánica de representar el fenómeno a través de modelos físicos, representados en una “chimenea de equilibrio o almenara” y en una “cámara de aire”, que permita arrojar datos que lleven al usuario a tener una idea clara de cómo se muestra el fenómeno en la vida real presente en un sistema hidráulico.

En la fase de simulación en el software, se representa cada uno de los ensayos de la fase anterior, donde se muestran resultados lo más posiblemente parecidos a los obtenidos en laboratorio.

Se comprueba la información, se hace un análisis y comparación entre lo obtenido en laboratorio y que da una vista de lo que pasa en la vida real, con lo arrojado en el software. En base a esto, se hace una comprobación por medio de unas ecuaciones ya estipuladas, las cuales, permiten conocer los valores de Z_{max} y Z_{min} que se presentan a causa del golpe de ariete y el cómo este es mitigado a través de los dispositivos de control ya mencionados.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Se comparó la formulación y el rendimiento computacional de dos métodos para la modelación de los fenómenos transitorios en sistemas de distribución de agua, uno de ellos es basado en Eulerian y el otro en Lagrangian. El primero resuelve las ecuaciones diferenciales de continuidad y momento y hace la comparativa del sistema hidráulico en puntos fijos a medida que el tiempo avanza en incrementos uniformes. El segundo método rastrea el movimiento y la transformación de las ondas de presión generadas y hace la comparativa en flujos de tiempo fijos o en instantes en los que realmente se genera algún cambio, se llegó a la conclusión de ambos métodos se podían usar pero que uno de ellos permitía hacer un análisis para sistemas de distribución de agua más grandes.¹

Un artículo que se hizo en mayo de 2005 se habla sobre la necesidad de un análisis transitorio de un sistema de distribución. Si bien uno de los desafíos a los que se enfrentan los servicios de agua y que es crítico, es el proteger la red de un exceso de transitorios o condiciones en las que se presente un golpe de ariete. El análisis de estos fenómenos es de vital importancia para estimar los peores escenarios en los que se vea comprometida la red de distribución de agua, los cuales están compuestos por tuberías, bombas, válvulas, depósitos y tanques. Se destaca que estos transitorios son más severos cuando se producen cambios rápidos, como el ingreso de fallas de energía, operaciones de válvulas de emergencia como en el caso de la extinción de incendios²

En el año de 2015, se realizó en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, un montaje que tuvo como finalidad el estudio del golpe de ariete , el cual fue una tesis de grado de ingeniería civil hecha por lo estudiantes **DAVID CAMILO BOHOREQUEZ FORERO y CAMILO ANDRES VELASQUEZ LEON**, que lleva el nombre de “ **MONTAJE DE UN MODELO FISICO PARA LA PRUEBA DE LA INCIDENCIA DEL FENOMENO DE GOLPE DE ARIETE E DIVERSAS LONGITUDES DE TUBERIA**”.³

¹ WOOD, Don J. LINGIREDDY, Srinivasa. BOULOS, Paul F. KARNEY, Bryan W. Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems [en línea] July 2005. [citado: 29, mar, 2019]. Disponible en internet:
http://kypipe.com/new_stuff/pubs/JAWWAJUL05_No97Vol7_WOOD.pdf

² JUNG, Bong Seog. KARNEY, Bryan W. BOULOS Paul F. WOOD Don J. The need for comprehensive transient analysis of distribution systems. [en línea] may 2005. [citado: 29, mar, 2019]. Disponible en internet:
<http://kypipe.com/new_stuff/pubs/JAWWAJAN07_No99Vol1_WOOD.pdf>

³BOHORQUEZ, David. VELASQUEZ, Camilo. Montaje de un modelo físico para la prueba de la incidencia del fenómeno de golpe de ariete e diversas longitudes de tubería. Bogotá D.C,

A continuación, se muestra lo que se quiso realizar y algunas conclusiones que obtuvieron de la tesis que se mencionó anteriormente. El suministro de agua potable en hogares permite identificar que el uso de válvulas de cierre rápido es muy común, para esto se pensó en realizar un montaje que abarque cada una de las características de las instalaciones de suministro de agua potable, para este caso se medirá el golpe de ariete y se lograra determinar, teniendo en cuenta diferentes diámetros y longitudes de tubería que puedan ser usadas para trabajar como las cámaras de presión

Se debe tener en cuenta que para la práctica se hicieron pruebas para la cámara de aire de diámetro una pulgada, es posible determinar que para las instalaciones hidrosanitarias en un hogar no es correcto realizar una instalación con este diámetro, ya que estas instalaciones son realizadas a media pulgada y constructivamente son más eficientes.

En el año 2017 los estudiantes de la Universidad Católica de Colombia Paula Alejandra Trujillo Sosa y Edwin Alexander Chitiva Tinjaca realizaron un mejoramiento de la tesis anteriormente mencionada “montaje del modelo físico para la prueba de la incidencia del fenómeno del golpe de ariete en diversas longitudes de tubería”; dicho mejoramiento pretende analizar el efecto del golpe de ariete y determinar la combinación longitud mínima y diámetro que mejor se ajuste al sistema para montar una cámara de aire o de quiebre de presión, para lo cual ellos instalaron unos medidores que tomaran las lecturas de presión más precisas y con eso generar unos cálculos matemáticas que determinaran el golpe de ariete que se generaba. Este fue un trabajo de tesis que lleva por nombre **“INTRUMENTACION DEL MODELO FISICO DE GOLPE DE ARIETE INSTALADO EN EL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA”** (Trujillo Sosa, Tinjaca & Alexander, 2017).⁴

En el año 2018 se presenta un trabajo de grado de investigación de la Universidad Católica de Colombia a cargo de los estudiantes Angie Stefania Collazos Castro y Juan José Laverde Rojas, que lleva de nombre **“DISEÑO Y CONTRUCCION DE UNA ALMENARA (DISPOSITIVO DE PROTECCION PARA DISIPAR EL GOLPE DE ARIETE)**. Ellos presentan en el trabajo responder a la necesidad de implementar un equipo físico, que solucione la problemática que exponen, el cual es el golpe de ariete, para lo cual lo desarrollan en cuatro fases que son diseño, construcción, operación y comprobación respectivamente. Empiezan recogiendo información relevante que sirva de estudio para el diseño de la estructura de control y que les permita pasar a la fase constructiva para garantizar la fase de operación y se logre menguar el golpe de ariete debido al cierre brusco de la válvula, por ultimo comprueban la información obtenido del equipo construido a través de dos

2015, 84p. Trabajo de investigación. Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

⁴ TRUJILLO, Paula. CHITIVA, Edwin. Instrumentación del modelo físico de golpe de ariete instalado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C, 2017, 78p. Trabajo de investigación. Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

métodos que la sincronizan y logran verificar los valores arrojados, mediante el flujo permanente o transitorio.⁵

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA

Conocer e interpretar de una manera adecuada el fenómeno de “golpe de ariete” que se presenta en sistema hidráulico es de vital importancia para identificar los problemas que este puede ocasionar. Este se reconoce por el incremento de la presión en una red de distribución de agua debido al cierre de válvulas, el cierre gradual o rápido de estas válvulas hace que en el sistema se generen depresiones y sobrepresiones que son ocasionadas por el movimiento oscilatorio del agua al interior de esta red. Es por esto, que como dispositivos de control y estructuras de protección, se expone el uso de una almenara y las cámaras de aire, los cuales, en estos sistemas permiten mitigar y disipar los efectos del golpe de ariete generado al abrir y cerrar una válvula.

De acuerdo a la bibliografía consultada donde se encuentran estudios ya realizados, se evidencia la necesidad de implementar modelos físicos junto con un modelo numérico que permita validar y comparar el comportamiento hidráulico de las almenaras y las cámaras de quiebre en redes, funcionando bajo flujo a presión. Se evidencia además la necesidad de definir la mejor combinación entre diámetro y longitud de cámara de aire que reduzca de forma más eficiente estas sobrepresiones generadas. Debido a esto se usan unas ecuaciones y métodos numéricos que permiten calcular estas presiones tanto en una almenara como en una cámara de aire, sin embargo, se sabe que para la almenara estas ecuaciones se encuentran ya estipuladas es por eso que ¿se puede obtener ecuaciones para el cálculo de la disipación de energía por golpe de ariete en una cámara de quiebre de presión?

⁵ COLLAZOS, Angie. LAVERDE, Juan. Diseño y construcción de una almenara (dispositivo de protección para disipar el golpe de ariete). Bogotá D.C. 2018, 95p. Trabajo de Investigación. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar la modelación computacional del comportamiento hidráulico del golpe de ariete en una almenara y en una cámara de aire, mediante el uso de un software de modelación de fenómenos transientes, de tal manera que se pueda comprobar la validez del software en la representación del comportamiento hidráulico de dicho fenómeno.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el comportamiento hidráulico del golpe de ariete en una almenara, utilizando el software de simulación de transientes hidráulico (Allievi) de tal manera que se puedan comparar y validar los resultados del modelo numérico con las mediciones en un modelo físico a escala de laboratorio.
- Modelar el comportamiento hidráulico del golpe de ariete en una cámara de aire, utilizando el software de simulación de transientes hidráulico (Allievi) de tal manera que se puedan comparar y validar los resultados del modelo numérico con las mediciones en un modelo físico a escala de laboratorio.
- Determinar la combinación diámetro – longitud de cámara de aire que presente la mejor atenuación del quiebre de las sobrepresiones generadas por el golpe de ariete en una red interna.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Se ha hablado de un fenómeno que se presenta en sistemas hidráulicos el cual afecta las tuberías al abrir y cerrar una válvula denominado “golpe de ariete”, generando un incremento de presiones un sistema de distribución de agua.

Por lo tanto, la importancia de realizar este estudio, es la implementación de un una almenara entre la línea que conecta a un reservorio con la válvula para que mitigue este incremento de presiones donde el agua se acelera o desacelera en la tubería lentamente, y se reduce la amplitud de las fluctuaciones de presión en el sistema, también el uso de cámaras de aire, de diferentes longitudes y diámetros que permitan determinar cuál es la más adecuada para reducir el exceso de presión generada por el golpe de ariete. Haciendo simulaciones en dos sistemas y un software que me permitirá comparar, observar, analizar, calcular y comprender más a fondo la incidencia de estas almenaras y cámaras en un sistema hidráulico.

1.5 MARCO TEORICO

1.5.1 GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico transitorio que se produce por las variaciones de velocidad que se presentan en un sistema y en el fluido que es transportado por este. Este fenómeno consiste en la propagación de ondas que generan sobrepresiones y supresiones a lo largo de las tuberías, esto es debido a la transformación de energía cinética en energía de presión. Hay grandes riesgos de que el golpe de ariete no sea controlado, pues llega a producir roturas de las tuberías a causa de las sobrepresiones y supresiones, ocasionando problemas de operación en el sistema hidráulico.

Cuando se habla de transiente hidráulico hace referencia a los eventos que son causados debido a un cambio en la operación del sistema, esto produce una variación de la velocidad del fluido y este cambio de velocidad genera cambios en la presión, propagándose en el sistema hidráulico a velocidades altas que llegan a tener valores cercanos o iguales a las de la velocidad del sonido, sin embargo esto es algo que depende de factores como: las paredes de la tubería, el suelo de la misma o la elasticidad del agua.

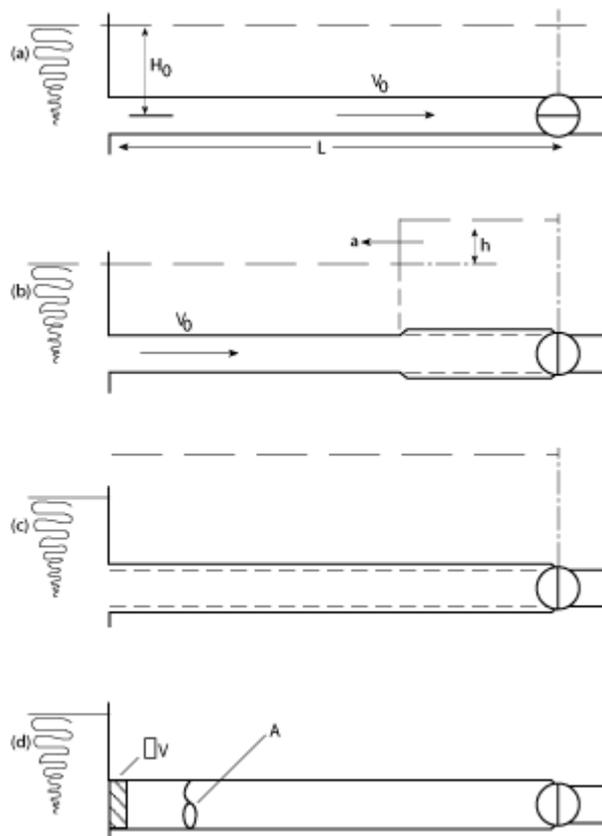
Es importante el análisis de los transitorios hidráulicos, pues, este análisis resulta ser más crítico que el análisis del sistema en régimen permanente. Las presiones durante el transitorio toman valores mayores, cuando los cambios de velocidad se generan a movimientos bruscos o repentinos, es decir al momento de un cierre rápido de una válvula o una parada de bombas por corte de energía; en ambos casos se generan ondas de presión de grandes magnitudes y se suman a las condiciones de presión que ya existían en el sistema, como consecuencia de la operación del sistema en régimen permanente y que excede la resistencia de la tubería. Este fenómeno se encuentra presente en acueductos, redes y demás sistemas de transporte de fluidos, las principales causas de este transitorio hidráulico es: apertura o cierres repentinos de válvulas, cambios bruscos de demanda, rotura de tuberías, cambios de nivel en tanques y reservorios o también el llenado y vaciado de tuberías.

Al pasar el tiempo este se ha convertido en un tema que ha ganado importancia y se desarrollaron distintos métodos gráficos y numéricos que representan y resuelven los transitorios hidráulicos, algunos de esos métodos y que son relevantes son: el método de las características a partir de ecuaciones diferenciales y el método de la onda característica, el cual, es a partir del cálculo y seguimiento de ondas de presión en el sistema. Ambos métodos permiten obtener resultados iguales, solo que el segundo necesita de menos pasos para llegar a la solución, lo que lo hace más eficiente y rápido.

Para entender el fenómeno se muestra en la **Figura 1**, donde se parte desde una condición inicial, donde la válvula está completamente abierta, siguiente a esto, la válvula está cerrada. Una onda de presión se mueve hacia arriba con velocidad "a". Al mismo tiempo el agua aun entra a la tubería con velocidad V_0 .

El frente de la onda continua agua arriba, hasta que alcanza el final, tomando un tiempo L/a para alcanzarlo. El tiempo $2L/a$ es conocido como el "periodo" de la tubería. Ahora si la cantidad total del agua que entra a la tubería durante este tiempo $1/2 \mu$ es ΔV , entonces, debido a que se está moviendo con velocidad V_0 , $\Delta V = 1/2 V_0 A \mu$. Este volumen total extra de agua está ocupando el espacio $(A \times L)$ donde A es la sección transversal de la tubería. El incremento de presión resultante o la presión del "golpe de ariete" es $P = K \times (\Delta V / \Delta L)$.

Figura 1. Cierre repentino de la válvula



Fuente: Pickford, John. 1969. Analysis of wáter surge. Gordon and Breach Science Publishers

1.5.2 ELEMENTOS DE CONTROL

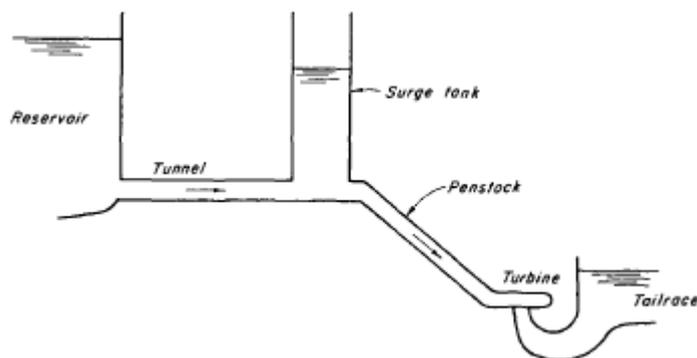
1.5.2.1 CHIMENEA DE EQUILIBRIO O ALMENARA

Una chimenea de equilibrio es una tubería vertical abierta y tiene un eje conectado a los conductos de una central hidroeléctrica o a la tubería de un

sistema de tuberías. También es conocido como almenara o cámara de compensación. Algunas de las funciones principales de una almenara son:

- Reduce la amplitud de las fluctuaciones de presión reflejadas por las ondas de presión que actúan en el sistema, es decir por las ondas generadas a causa del golpe de ariete producidas en una tubería por cierres repentinos de válvulas o por cambios de carga en una turbina, como se muestra en la **Figura 2**. Por lo tanto, la longitud del conducto que se utilizara en el estudio del golpe de ariete es, entre la válvula y la almenara, en vez de la válvula y el tanque de almacenamiento. Debido a esta reducción en la longitud del conducto, las sobrepresión o supresiones, son menores que si no se proporciona la almenara, de lo contrario, si esto no existiera, la tubería por la cual es transportado el fluido, debería ser diseñada y construida de tal manera que soporte las presiones creadas por el golpe de ariete.
- Una almenara mejora las características de regulación de una turbina hidráulica o una válvula, esto es debido a que la almenara, la longitud de la tubería que se utiliza para determinar el tiempo de arranque del agua, depende de la almenara en lugar del reservorio donde se almacena el agua. Por lo tanto, el tiempo de arranque del agua de un esquema de energía hidroeléctrica se reduce, mejorando así las características de regulación.
- Una almenara actúa como un almacenamiento para el exceso de agua durante la reducción de carga en un sistema hidráulico y durante el arranque de las bombas o apertura de las válvulas. De manera similar, proporciona agua durante la aceptación de la carga en una planta hidroeléctrica y durante fallas en el sistema de bombeo. Es por esto que el agua se acelera o desacelera lentamente en la tubería y se reduce la amplitud de las fluctuaciones de presión en el sistema.

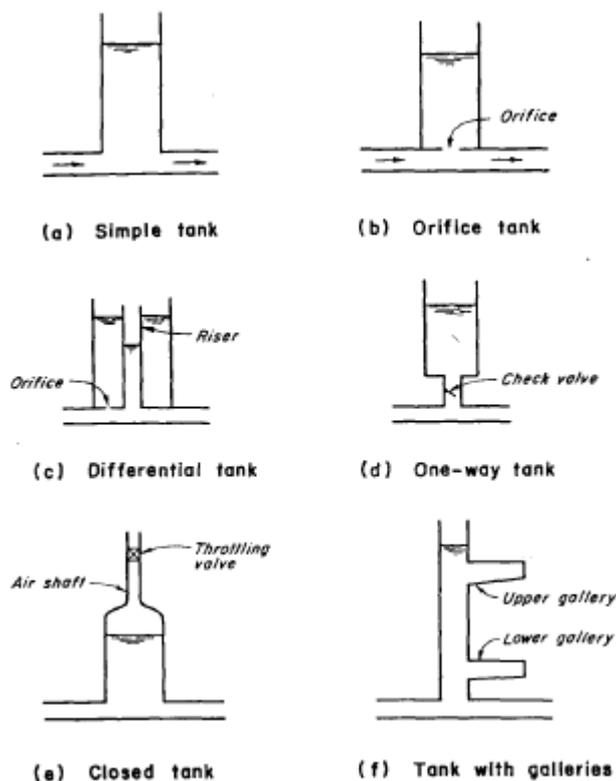
Figura 2. Diagrama del sistema con una almenara en una planta hidroeléctrica



Fuente: CHAUDHRY M. Hanif. Applied hydraulic transients. Primera edición.
Canada, Vancouver.

Dependiendo de la configuración que se desea, una almenara puede clasificarse en varios tipos como: simple, orificio, diferencial, unidireccional o cerrado. Una almenara simple está compuesta de un solo eje o un tubo vertical conectado a la tubería. Si la entrada a la almenara está restringida por medio de un orificio, es considerada como una almenara de orificio. Así mismo aquellas que tiene un tubo ascendente son llamadas almenaras diferenciales. En un almenara de un solo sentido, el liquido fluye desde el tanque hacia la tubería solo cuando la presión en la tubería se encuentra por debajo del nivel del fluido de la almenara. Siguiendo en las condiciones del fenómeno transitorio, la almenara se llena desde la tubería. Si la parte superior de la almenara está cerrado o si hay una válvula u orificio en la parte de la ventilación que conecta a la almenara con la atmosfera exterior, se llama almenara cerrada. Dependiendo de la funcionalidad que se quiera dar a la almenara, una que es de carácter simple puede tener galerías superiores o inferiores. En la **Figura 3** se muestra el modelo de estas almenaras anteriormente mencionadas; existen casos especiales en los cuales se puede implementar una combinación de diferentes tipos de almenaras en el sistema hidráulico.

Figura 3. Tipos de almenaras

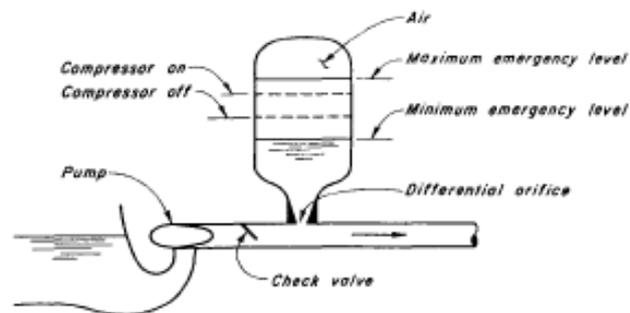


Fuente: CHAUDHRY M. Hanif. applied hydraulic transients. Primera edición. Canada, Vancouver.

1.5.2.2 CAMARAS DE QUIEBRE DE PRESION

Una cámara de aire o de quiebre de presión, es un recipiente que contiene aire comprimido en su parte superior y un fluido en la parte inferior. Para restringir la entrada o salida de la cámara, generalmente se proporciona un orificio entre la cámara y la tubería. Un orificio que tiene una forma que llega a producir más pérdida de carga en la entrada a la cámara de aire, que en el flujo de salida de la cámara, se le conoce con el nombre de orificio diferencial, como se muestra en la **Figura 4**. Con el fin de evitar presiones mínimas muy bajas en la tubería y por lo tanto, que se efectúe la separación de la columna, el flujo de salida de la cámara debe ser lo más libre posible, mientras que la entrada puede restringirse para reducir el tamaño de la cámara. Se usa comúnmente una relación de 2.5: entre las pérdidas de la cabeza del orificio para la misma entrada y salida. Debido a que el volumen de aire puede reducirse a causa de fugas o en relación a la solución en el líquido, se usa un compresor de aire para mantener el volumen del aire dentro de los límites establecidos.

Figura 4. Cámara de aire con orificio diferencial



Fuente: CHAUDHRY M. Hanif. applied hydraulic transients. Primera edición.
Canada, Vancouver.

Es muy común ver en los sistemas hidráulicos que se proporcione una válvula cuyo objetivo sea la retención entre la bomba y la cámara de aire, como se evidencia en la **Figura 4**. Si se presenta una falla de energía, la presión en la tubería cae y el líquido se suministra desde la cámara a la tubería. Cuando el flujo presente en la tubería se invierte, la válvula de retención se cierra instantáneamente y el líquido fluye hacia la cámara. Debido al flujo de entrada o salida de la cámara, el aire en la cámara se contrae o se expande, y la magnitud del aumento y la caída de la presión se reducen debido a la variación gradual de la velocidad del flujo en la tubería. En relación a la cámara de aire con respecto a una almenara, se encuentran las siguientes ventajas:

- El volumen de una cámara de aire que se requiere para mantener las presiones máximas y mínimas dentro de unos límites aceptables suele ser menor que el necesitado por una almenara.
- Se pueden hacer instalaciones de estas cámaras paralelas a las pendientes del terreno lo que hace que los costos sean menores y presente mejores resistencias a las cargas generadas por viento y terremotos.
- Se pueden instalar cámaras cerca de las bombas, lo que puede que no sea muy práctico en las almenaras debido a las diferencias de alturas. Esto reduce la presión, ascenso y caída de presión en las tuberías.
- Para evitar el congelamiento del líquido en climas fríos, es más económico calentar la cámara de aire y no la almenara debido a su tamaño ya que este es menor.

1.5.2.3 VALVULAS

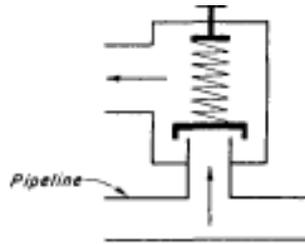
Dependiendo del tipo, se usa una válvula para controlar los fenómenos transitorios mediante cualquiera de las siguientes operaciones: la válvula se abre o cierra para reducir las velocidades del flujo en la tubería. También permite la salida rápida del líquido de la tubería si la presión excede un límite establecido. Este flujo de salida provoca una caída de presión, reduciendo así la presión máxima. La válvula se abre para admitir aire en la tubería, evitando así que la presión caiga a la presión de vapor líquido.

Una serie de válvulas comúnmente utilizadas para controlar transitorios son:

- Válvulas de seguridad
- Válvulas de alivio de presión
- Válvulas reguladoras de presión.
- Válvulas de entrada de aire
- Válvulas de retención.

Una válvula de seguridad o una válvula de descarga de sobrepresión como se muestra en la **Figura 5** es una válvula de resorte, que se abre tan pronto como la presión dentro de la tubería excede la presión establecida en la válvula. La válvula se cierra abruptamente cuando la presión cae por debajo del límite establecido en la válvula. Una válvula de seguridad está completamente abierta o completamente cerrada.

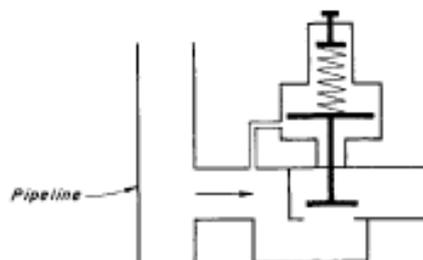
Figura 5. Válvula de seguridad o descarga de sobrepresión



Fuente: CHAUDHRY M. Hanif. applied hydraulic transients. Primera edición.
Canada, Vancouver.

El funcionamiento de una válvula de alivio de presión o un supresor de sobretensión que se muestra en la **Figura 6**, es similar al de una válvula de seguridad, excepto que su apertura es proporcional a la cantidad en que la presión en la tubería aguas arriba de la válvula excede la que ya existe. La válvula se cierra cuando la presión de la tubería cae y se cierra completamente cuando la presión está por debajo del límite establecido en la válvula. Por lo general, existe cierto conflicto en los tiempos de apertura y el cierre de la válvula.

Figura 6. Válvula de alivio o supresor de sobretensión



Fuente: CHAUDHRY M. Hanif. applied hydraulic transients. Primera edición.
Canada, Vancouver.

Para cuando se tiene presente un sistema de bombeo que tiene más de una bomba descargando en un cabezal común, una batería de válvulas de alivio de menor tamaño o supresor de sobretensión puede usarse en lugar de un supresor de sobretensión grande. Se puede instalar un supresor en cada bomba o se puede montar la batería completa de los supresores en la línea de descarga principal. En la última disposición, el ajuste de sobrepresión de cada válvula debe establecerse de manera que las válvulas se abran en secuencia una tras otra en lugar de que a la vez.

1.5.3 METODOS NUMERICOS

1.5.3.1 METODO DE LAS CARACTERISTICAS

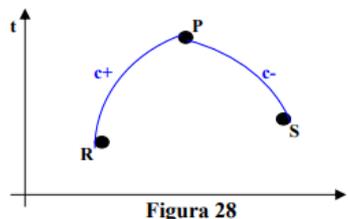
El método de las características consiste en una resolución numérica, con unas condiciones de borde que se imponen por cada problema propuesto. Es importante saber, que este método es el más general o usado para calcular transitorios, pues este se dispone para resolver el problema, donde no hay simplificaciones que distorsionen los resultados. Este método parte de las ecuaciones diferenciales de Saint Venant, donde siendo despejadas y multiplicadas por unos factores se llega a tener lo siguiente:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

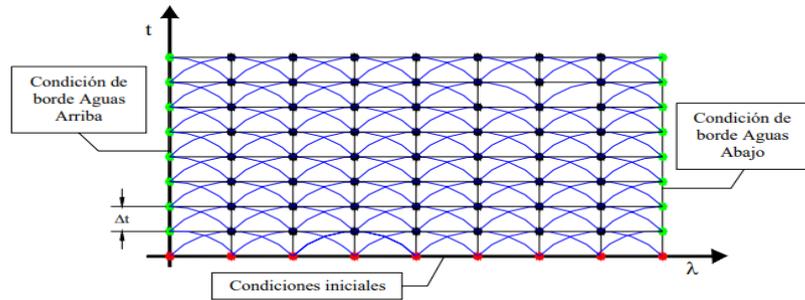
Estas ecuaciones diferenciales se encuentran en derivadas parciales que son no lineales, se encuentran en función de L y t y contienen dos incógnitas que son U y H. Estas ecuaciones se derivan para simular el conducto y se desarrollan a partir de unas condiciones de contorno. Luego se presentan los criterios de estabilidad y convergencia para la estabilidad del esquema y se describe el procedimiento para el análisis de los sistemas de tuberías. Para comprender mejor estos procedimientos, se considera que la solución se obtiene en un diagrama L,t , se generan unas curvas y puntos que son validos para las ecuaciones y así partiendo de condiciones conocidas y hallando nuevas intersecciones entre los puntos de las curvas generadas, se obtienen las alturas y las velocidades para tiempos posteriores , como se muestra en la **Figura 7** y **Figura 8** correspondientemente

Figura 7.Diagrama L,t con las curvas generadas



Fuente: Estudio de transitorios, golpe de ariete. Universidad de Buenos Aires.
Facultad de ingeniería

Figura 8.Diagrama L,t condiciones de borde. Alturas y velocidades posteriores



Fuente: Estudio de transitorios, golpe de ariete. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ingeniería

1.6 MARCO CONCEPTUAL

1.6.1 ECUACION PARA EL PERIODO DE LA ONDA DE PRESION

La onda viaja a través de un sistema de un extremo a otro, por lo cual el tiempo que dura la onda es considerado como el periodo que tarda en llegar desde que se cierra la válvula y llega al tanque y se devuelve, a continuación se plantean las *ecuación (1)* y *ecuación (2)*, para las cuales se calcula este periodo cuando el sistema no tiene almenara y otro cuando si tiene:

$$T = \frac{2l}{a} \quad (1)$$

T = periodo de tiempo máximo de reflexión de la onda.
 a = celeridad o velocidad de propagación de onda (m/s)
 L = Longitud de la tubería (m)

$$T = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{Ac b L}{g A c}} \quad (2)$$

Ac = área transversal de la conducción.
 Ach = área transversal de la chimenea.
 g = aceleración de la gravedad.
 L = Longitud de la tubería

1.6.2 CALCULO DE LA CELERIDAD DE LA ONDA DE PRESION

La celeridad es entendida como la velocidad a la que se propaga la onda de presión a través del sistema hidráulico o del agua que se encuentra contenida en el sistema de tuberías. Para el cálculo de esta celeridad se halla mediante la *ecuación (3)*:

$$C = \frac{1480}{\sqrt{1 + \left(\frac{Ev}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)}} \quad (3)$$

C = celeridad de la onda de presión (m/s)

E (Ea) = módulo de elasticidad del agua (kg/m²) o módulo de elasticidad volumétrico.

E (ε) = módulo de elasticidad del material de conducción (kg/m²).

D = diámetro interno de la tubería (m).

e = espesor de la tubería (m).

El valor de esta celeridad depende fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción, así como de la compresibilidad del agua. Allievi propone una ecuación para este cálculo de celeridad, que permite una evaluación rápida cuando el fluido que circula por las tuberías es agua y se muestra en la *ecuación (4)*:

$$\alpha = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + Kc \frac{Dt}{e}}} \quad (4)$$

Donde

α: Onda de Celeridad.

Kc: Es un valor adimensional, calculado a partir de la siguiente *ecuación (5)*:

$$Kc = \frac{10^{10}}{E} \quad (5)$$

Donde, E: Es el módulo de elasticidad del material de la tubería en Kg/m²

Estos módulos de elasticidad del material de conducción se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Modulo de elasticidad de los materiales de conducción

<i>Material</i>	<i>E (Pa)</i>
Acero	2.06 X 10 ¹¹
Asbesto cemento	2.40 X 10 ¹⁰
P.V.C.	1.10 X 10 ⁹
Fierro fundido	9.11 X 10 ¹⁰
Cobre	1.19 X 10 ¹¹
Bronce	1.03 X 10 ¹¹
Latón	1.03 X 10 ¹¹
Zinc	3.63 X 10 ¹⁰
Plomo	1.37 X 10 ¹⁰
Estaño	1.27 X 10 ¹¹
Aluminio	7.05 X 10 ¹⁰
Concreto simple	1.23 X 10 ¹⁰
Madera	6.86 X 10 ⁹
Hule	3.43 X 10 ⁹
Vidrio	6.86 X 10 ¹⁰

Fuente: CFE (Comisión Federal de Electricidad), (1981)

1.6.3 TIPOS DE CIERRE DE LAS VALVULAS

Se considera que dentro del sistema de tuberías el fluido circula de forma uniforme, esto quiere decir que no tiene una variación en el tiempo y el espacio; además deben considerarse las pérdidas que se generan en la conducción, por lo cual en los dispositivos de control se verá reflejado un nivel de flujo en el momento en el cual, la válvula de regulación se encuentre completamente abierta; una vez se efectuó la maniobra de cerrado este flujo deja de ser uniforme y se genera una onda, que hace que se refleje en las oscilaciones dentro de estructura de control, a lo que se le conoce como pasar de estar en un régimen permanente a un régimen transitorio.

Se plantean dos métodos, los cuales consideran la velocidad de propagación de la onda por medio de la tubería, reflejando que a menor velocidad de recorrido de la onda, el periodo de la onda será mucho mayor, para lo cual se considera un procedimiento matemático diferente que lo propone MICHAUD más si por lo contrario el fenómeno se ve representado por el cierre brusco nos enfrentaremos al cálculo por medio del aporte de ALLIEVI. Dichos métodos se expresan en la ecuación (6) y ecuación (7).

Para cierres lentos aplicamos la ecuación de Michaud:

$$\Delta H = \pm \frac{2 * L * U}{g * t M} \quad (6)$$

Donde:

U: Velocidad de circulación del agua.

tM: Tiempo de cierre de la válvula de corte
g: Gravedad.
L: Es la longitud de la conducción en metros.

En el caso de cierres rápidos aplicaremos la ecuación de Allievi:

$$\Delta H = \pm \frac{\alpha * U}{g} \quad (7)$$

Donde:

α : Onda de celeridad.

U: Velocidad de circulación del agua.

g: Gravedad.

Finalmente se debe considerar los valores de presión máxima y mínima que soporta la tubería y se debe comprobar si el sistema de tuberías tiene capacidad para resistir estas presiones. Se tiene entonces que máxima presión soportada por la tubería será la suma de la sobrepresión por golpe de ariete (ΔH) y la presión estática (Hg). La suma de ambas deberá de ser inferior a la presión máxima admisible por el tubo.

1.6.4 SOFTWARE PARA CÁLCULO DE TRANSITORIOS (ALLIEVI)

Allievi es un software profesional para el cálculo y simulación de transitorios hidráulicos en sistemas a presión y en lámina libre. Se encuentra basado en un algoritmo propietario que viene utilizándose con éxito durante décadas en trabajos de consultoría y asesoría técnica. Allievi es uno de los pocos paquetes de software a nivel mundial que permite calcular transitorios en sistemas hidráulicos de manera fiable. Algunos de sus funciones principales son:

- Cálculo del régimen permanente con las mismas ecuaciones del método de las características. Allievi calcula el régimen permanente como condiciones iniciales para la simulación del transitorio.
- Incorporación de curvas de pérdidas típicas de válvulas convencionales. Posibilidad de trabajar con datos de válvulas y ventosas comerciales.
- Incorporación del funcionamiento en régimen transitorio de válvulas automáticas, con función de reductoras de presión, sostenedor de presión y limitador de caudal.
- Funcionamiento conjunto de canales en lámina libre y conductos a presión, para simular el funcionamiento en régimen transitorio de sistemas hidráulicos combinados.

- Asistentes de cálculo para la celeridad, la presión de hinchado de calderines, el momento de inercia de los grupos de bombeo, así como recursos adicionales para la entrada de datos.

1.6.4.1 FUNDAMENTOS PARA EL CÁLCULO DE TRANSITORIOS EN ALLIEVI

Para el caso de los conductos a presión, el régimen transitorio se modela a partir de la conservación de masa y de la cantidad de volumen en movimiento dentro de la conducción, siendo controlada e incluyendo la onda de presión; a partir de esta exigencia el software propone dos ecuaciones diferenciales no lineales con dos incógnitas:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V(V)}{2D} = 0$$

Donde las variables no conocidas son:

H=H (x, t) Altura piezométrica

V= V (x, t) velocidad

Este sistema no tiene solución analítica, así que, bajo una hipótesis, se deberá considerar convertir las ecuaciones diferenciales anteriores a un sistema de ecuaciones algebraicas lineales; para esto, se debe tomar un (Δt) determinado para que la solución supuesta, sea en instantes de tiempo separados entre sí, teniendo puntos concretos sobre la conducción (Δx).

Bajo esta condición se representa la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = a$$

Donde (a) es la celeridad de la onda de presión en la tubería. La celeridad cambia para el tipo de fluido; ALLIEVI integra la fórmula de celeridad para el caso del agua mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{47,6 + C \frac{D}{e}}}$$

Donde la ecuación dependerá del diámetro, espesor y coeficiente de la tubería que a su vez es dependiente del material de la tubería. De esta manera, se obtienen las ecuaciones algebraicas, lineales, con dos incógnitas, siendo un sistema determinado de la siguiente manera:

$$H_i^{n+1} - H_{i-1}^n - \frac{a}{g}(V_i^{n+1} - V_{i+1}^n) - \frac{f_{i-1}^n \Delta x}{D} V_{i+1}^n |V_{i+1}^n|$$

A esto se le llama método de las características, fundamento teórico del cálculo transitorio en el programa ALLIEVI. El funcionamiento teórico de estas ecuaciones, es para el cálculo en todos los puntos del conducto de la tubería, a excepción de sus extremos, en donde falta una de las dos ecuaciones. Para los extremos, se supone una conexión con un elemento de la red y de esta manera ALLIEVI sustituye la ecuación, por el conjunto de ecuaciones que representan el comportamiento del elemento conectado.⁶

1.7 ESTADO DEL ARTE

- Una norma india, se instaura por primera vez en el año de 1975, cuando se realiza un comité seccional de sistemas de conductores de agua, el cual, es aprobado por el consejo de la división de ingeniería civil, se habla de almenaras para evitar el golpe de ariete, los cuales son ubicados aguas debajo de las turbinas de descarga. Según este artículo la resistencia generada por la almenara puede eliminarse cuando se asegura condiciones de flujo libre en las tuberías, sin embargo, tiene una contraindicación, la cual es que para tuberías de longitudes mayores no suele ser tan rentable o económico realizar estas almenaras.⁷
- Se muestra la importancia del uso de almenaras, para el análisis de flujo inestable en las instalaciones de energía hidráulica. Se destaca el flujo transitorio en tuberías y túneles de conducción, que se simulan utilizando ecuaciones del fenómeno de golpe de ariete y la importancia de la ubicación de estos tanques, ya sea aguas arriba o aguas abajo, para tener un equilibrio en las presiones.

Se muestran unos modelos matemáticos por medio de ecuaciones, en los cuales se toman diversos tiempos al abrir y cerrar válvulas o compuertas para determinar la variación del flujo transitorio y medir las oscilaciones de presión presentes en las tuberías. Se realizan modelos por computadora que se usan en base al método de las características que consideran la fricción inestable y se determina que el

⁶ tomado del manual técnico ALLIEVI (ferreira junior, Franchini, Bazzo, & Werson, 2016).

⁷SHIRI P. M. Mane. Criteria for hydraulic desing for the surge tank. En: Indian Standard. Part 2 (oct.1985) p. 3-5.

comportamiento del flujo transitorio se mejora con el cierre de la compuerta de paso.⁸

- Se identifica tres funcionamientos de las almenaras que benefician a un sistema, que son, el poder acortar la distancia entre la entrada de la turbina y la superficie libre de agua lo que garantiza que se reduzca la intensidad de las olas en el golpe de ariete, también se muestra una reducción en la carga de la turbina y se expone como, que el agua presente en la cámara aumenta, lo que hace que exista un retardo en el flujo del conducto principal, absorbiendo gran parte de la energía que se presenta, y por último se habla de un aumento en la carga de la turbina ocasionando que la cámara actué como un depósito que proporcionara agua para que la turbina recoja carga o funcione de forma segura. Se realiza un modelo matemático utilizando ecuaciones de Chaudhry, Wylie, Streeter y Parmakian, que interpreten mejor el comportamiento de estos tanques frente al golpe de ariete y se realizan modelaciones computacionales donde se arrojan gráficas y datos del comportamiento de las ondas que se generan en un tiempo (t).⁹
- Se realiza un modelo numérico que estima la sobrepresión transmitida en los conductos aguas arriba de proyectos hidroeléctricos, es por eso que, se hace esto para resolver unas ecuaciones de flujo no permanente que se presenta en los tanques de oscilación. Dichos tanques con orificio permiten reducir dimensiones del mismo que un tanque simple, sin embargo, ellos exponen una desventaja y es que la presión bajo el orificio aumenta rápidamente, cosa que no se presenta en un tanque sin orificio, es por eso que, es de vital importancia determinar el tamaño mínimo de este orificio para que no se generen este tipo de sobrepresiones.¹⁰
- Se proporciona una comprensión básica de los fenómenos físicos y el contexto de las condiciones transitorias, se muestra guías prácticas para la supresión y control y se hace una comparación entre la formulación y el rendimiento computacional de esquemas de simulación, de los transitorios hidráulicos que son ampliamente utilizados. Estas comparaciones permiten mejorar en gran medida la capacidad de los servicios de agua, para así poder desarrollar estrategias de protección y gestión del suministro de agua, que sea rentable y confiable para la salud pública.¹¹

⁸STROJNIŠKI, Vestnik. Simulation of Transient Flow in Hydroelectric Power Plants Using Unsteady Friction. [en línea] 2009 [citado: 14, mar, 2019]. disponible en internet:

<https://www.researchgate.net/profile/Mehrdad_Raisee_Dehekordi/publication/279462120_Simulation_of_Transient_Flow_in_Hydroelectric_Power_Plants_Using_Unsteady_Friction/links/55b95fa308aec0e5f43c3376/Simulation-of-Transient-Flow-in-Hydroelectric-Power-Plants-Using-Unsteady-Friction.pdf>.

⁹PAK. J. Engg. Hydraulic Transient Analysis of Surge Tanks: Case Study of Satpara and Golen Gol Hydropower Projects in Pakista. [en línea] 2011. [citado: 14, mar, 2019]. disponible en internet: < <http://docplayer.net/50675199-Hydraulic-transient-analysis-of-surge-tanks-case-study-of-satpara-and-golen-gol-hydropower-projects-in-pakistan.html>>.

¹⁰VARGAS, Omar. JIMENES, Oscar. Protección de conducciones mediante tanques de oscilación con orificios. [en línea]. 1996. [citado: 14, mar, 2019]. Disponible en internet: <https://www.researchgate.net/publication/283091832_PROTECCION_DE_CONDUCCIONES_MEDIANTE_TANQUES_DE_OSCILACION_CON_ORIFICIOS>

¹¹ BOULOS Paul F. KARNEY Bryan W. WOOD Don J. LINGIREDDY Srinivasa. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. [en línea] May 2005. [citado: 29, mar, 2019]. Disponible en internet:

- La falla de la energía de las bombas y válvulas en los sistemas de tuberías, es uno de los factores más importantes que causan el golpe de ariete. Para prevenir los efectos destructivos de este fenómeno, se expone el uso de tuberías de capacidad de compresión adecuada y dispositivos de control como cámaras de aire y válvulas de control. Se asegura que en un sistema de transmisión la disminución del grosor de la tubería de conducción, existe una disminución en la velocidad del flujo y de la velocidad de las ondas de compresión, por lo cual, se reduce el efecto del golpe de ariete. El documento presenta un modelo de optimización para la selección del mejor diámetro y material de la tubería, que contrarreste el golpe de ariete en sistemas de tuberías.¹²

- Las cámaras de aire son dispositivos mecánicos capaces de disminuir las presiones positivas y negativas del golpe de ariete, sin embargo las cámaras de aire de gran tamaño pueden aumentar los costos. Este es un documento en el cual el objetivo de la investigación es a partir de un modelo, se ubiquen las válvulas de entrada de aire y que el tamaño de la cámara de aire, se determine, de manera que el costo total sea minimizado mientras las presiones generadas a lo largo de la tubería se encuentren entre el rango permitido. Se realiza una modelación donde se determina el número adecuado de válvulas de entrada de aire y los tipos que deben utilizar.¹³

1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES

Se establece unas prácticas de laboratorio que se llevan a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia. Para la realización de estas prácticas es necesario solicitar al coordinación de laboratorios de la facultad de ingeniería Civil, el préstamo de las instalaciones y equipos que se requirieron para la realización de los ensayos y tomas de datos. Algunas prácticas tienen que ser reprogramadas y repetidas debido a la alta demanda de estudiantes con solicitudes pendientes. No obstante esto permite identificar posibles errores a la hora de tomar datos y de calibrar los equipos, por lo cual, se tiene una mayor certeza en la validación de los resultados obtenidos

Para alcanzar el objetivo principal del proyecto se lleva a cabo la modelación computacional del fenómeno analizado en laboratorio en una almenara y en una cámara de aire. De esta manera se compara y valida los datos obtenidos en los ensayos con los de la modelación, algo que permite entender a mayor escala cómo se comporta el golpe de ariete y cuál es la mejor manera de poder

<http://kypipe.com/new_stuff/pubs/JAWWAMAY05_No97Vol5_WOOD.pdf>.

¹² S Mahmood, J. M. (2018). The steady-transient optimization of water transmission pipelines with consideration of water-hammer control devices: A case study. *Journal of Water Supply : Research and Technology - AQUA*, 67(6), 556-565. doi:<http://dx.doi.org.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/10.2166/aqua.2018.018>

¹³ Moghaddas, S. M., Samani, H. M., V., & Haghghi, A. (2017). Transient protection optimization of pipelines using air-chamber and air-inlet valves. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1991-1997. doi:<http://dx.doi.org.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/10.1007/s12205-016-0836-4>

mitigar esta problemática. Así mismo se incentiva al estudiante, poner en práctica el uso de herramientas tecnológicas que le ayuden a ampliar su conocimiento en diferentes ramas de la ingeniería y garanticen tener un pensamiento crítico para la solución de problemas.

2. METODOLOGIA

En este numeral se da a conocer el procedimiento que llevo a cabo para la realización y desarrollo del trabajo de investigación. La metodología que se utilizo consta de cuatro (4) fases que se consideraron pertinentes para alcanzar los objetivos propuestos, las cuales son:

- Fase 1: se realizaron los laboratorios necesarios con el objetivo de obtener los datos suficientes, tales como caudales, tiempos de cierre y alturas máximas y mínimas. Estos datos obtenidos fueron procesados y tabulados para su respectivo análisis y formulación de graficas que permitieron identificar y comprender mejor el régimen transitorio causado por el golpe de ariete presente en dispositivos de protección como lo son las almenaras y las cámaras de aire o quiebre de presión.
- Fase 2: Se llevo a cabo la modelación computacional a través del software ALLIEVI, donde en primera instancia se realizaron los montajes sin los dispositivos de control, con el fin de tener una condición inicial que permitiera conocer el comportamiento y el impacto que tiene el golpe de ariete en sistemas de tuberías. Siguiendo a esto, se realizo la modelación de los mismos sistemas pero ya con los dispositivos de protección, a los cuales se les introdujo los datos base para que el programa calculara el régimen permanente y transitorio correctamente.
- Fase 3: siguiendo la fase anterior se realizo la comparación de los resultados obtenidos en laboratorios con los arrojados por el programa de modelación. Dicha comparación se realizo a través de métodos matemáticos y numéricos encontrados que permitieron obtener valores de Z_{max} y Z_{min} en cm, a través de los tiempos de oscilación, niveles de flujo y niveles estáticos, como también para diferentes caudales, en este caso los manejados en el trabajo de investigación.
- Fase 4: por último se realizo un ajuste de los resultados obtenidos por la cámara de quiebre de presión, para así obtener una ecuación que permita conocer la mejor combinación diámetro – longitud para emplear en sistemas hidrosanitarios con el fin de contrarrestar los problemas y

efectos causados por la apertura rápida de válvulas que generan el fenómeno del golpe de ariete.

2.1 ENSAYOS Y PRÁCTICAS DE LABORATORIO

2.1.1 ENSAYO – MONTAJE ALMENARA

La primera práctica de laboratorio que se realizó para la toma de datos fue para el montaje que contiene la estructura de protección de la almenara, para lo cual, se seleccionaron tres caudales para el ensayo, un caudal máximo, uno medio y uno mínimo. Para obtener estos caudales, fue necesario realizar un aforo de caudal, por medio del volumen ocupado en un recipiente y el respectivo tiempo en que se llenó y la masa que obtuvo este volumen de agua. Dicho aforo se realizó en la siguiente sección del montaje y que se muestra en la **Figura 9**

Figura 9. Tanque de aforo de caudal



Fuente: autor

Después de obtener los caudales con los que se realizará el ensayo, se prosiguió a determinar el tiempo de cierre de la válvula de bola; este tiempo es importante, pues es el que determina si el cierre es lento o rápido y así mismo influye en el efecto del golpe de ariete y en los datos de Z_{max} y Z_{min} que se obtienen. Esta válvula se aprecia en la **Figura 10**

Figura 10. Válvula de regulación (válvula de bola)



Fuente: autor

Siguiente a esto se continuó con el ensayo, en el cual para cada caudal se tomaron los datos de Z_{max} y Z_{min} (cm), como así también, los tiempos de oscilación (s), nivel de flujo (cm) y nivel estático (cm). El montaje en el cual se trabajó y se muestra de mejor manera la almenara se evidencia en la **Figura 11** y **Figura 12**

Figura 11. Montaje experimental - almenara



Fuente: autor

Figura 12. Montaje experimental – almenara



Fuente: autor

2.1.2 ENSAYO – MONTAJE CAMARA DE QUIEBRE DE PRESION

En esta práctica de laboratorio, lo primero que se realizo fue seleccionar y determinar las cámaras de aire que se utilizaron para el ensayo; así mismo tomar los datos de diámetros y longitudes de las diferentes cámaras que se ensayaran en el sistema. Estas cámaras se aprecian en la **Figura 13**

Figura 13. Cámaras de aire



Fuente: autor

Posteriormente a esto, se realizó el aforo para determinar los caudales que se usarán en el ensayo, en este caso se escogieron seis caudales. En la **Figura 14** se muestra los diferentes caudales a utilizar y el tanque de aforo.

Figura 14.Tanque de aforo para caudal



Fuente: autor.

El siguiente paso, fue someter el montaje a un golpe de ariete sin cámara de quiebre de presión, con lo cual se registro los valores de este fenómeno y se parte desde una condición inicial como se muestra en la **Figura 15**

Figura 15.Condición inicial – sin cámara de aire



Fuente: autor.

Por último, se empezó a ensayar cada una de las cámaras escogidas para cada uno de los caudales determinados, recopilando así por medio de video los datos de presión arrojados por los transductores; se quiso hacer en video, debido a que las oscilaciones del golpe de ariete son tan rápidas, que no se logra registrar rápido los valores arrojados, consiguiendo de esta manera unos valores precisos a la hora de querer analizarlos. La ultima cámara de quiebre ensayada se muestra en la **Figura 16**

Figura 16.Ensayo de cámara de quiebre de presión



Fuente: autor

2.2 CALCULO DE PERDIDAS EN EL SISTEMA

Para el cálculo de las pérdidas en el sistema hidráulico que está compuesto por la estructura de protección de la almenara, se deben tener unos datos iniciales, como lo son: el caudal que circula por el sistema de tuberías, la altura estática del nivel de agua, la velocidad con la se mueve le fluido y el diámetro de la tubería, para lo cual, es necesario emplear la siguiente ecuación:

$$H_f = f + \frac{l}{D} + \frac{V^2}{2g}$$

Para efectuar la ecuación anterior, es necesario conocer el factor f y para esto, es necesario hacer un proceso de iteración para obtenerlo a través de la siguiente ecuación:

$$f = -2 \log \left(\frac{k_s}{3,7d} + \frac{V^2}{2g} \right) f$$

De acuerdo, a las especificaciones del material de la tubería por donde fluye el fluido es necesario conocer el factor k_s , en este caso, el material de la tubería es PVC, por lo cual, se debe buscar el factor que aplica para este caso.

Obteniendo este valor f , se calcula el valor de las pérdidas por fricción en la tubería. Para el cálculo de las pérdidas menores se tiene la siguiente ecuación:

$$H_m = K_m \frac{v^2}{2g}$$

El factor k_m es el coeficiente de los accesorios en las tuberías, que para este caso tiene un valor de 0,8. El cálculo total de las pérdidas generadas en el sistema hidráulico se da de la siguiente manera:

$$H_T = H_f + H_m$$

2.3 METODOS Y ECUACIONES PARA EL CALCULO DE Z MAX

2.3.1 METODOS PARA LA ALMENARA

El diseño experimental de la almenara será verificado mediante dos métodos propuestos, los cuales permitirán verificar los valores arrojados tanto por el método numérico o matemático, como por el método del software; estos métodos son:

- Método teórico de *Armin Schoklitsch*: Este método comprueba por medio de ecuaciones, el valor de la altura máxima (Z_{max}) que presenta el nivel

del agua al interior de la almenara, haciendo una demostración matemática de la actividad de la onda producida por el fenómeno del golpe de ariete.

- Método numérico de *Allievi*: este logra simular mediante un software el comportamiento dinámico del fluido contenido en una conducción forzada, en donde, representa las características transitorias del agua por causa de un cierre brusco de la válvula de regulación.

2.3.1.1 MÉTODO TEORICO DE ARMIN SCHOKLITSCH

Para el cálculo de la altura máxima que presenta el nivel del agua al interior de la chimenea de equilibrio; Schoklitsch plantea una ecuación de Z máx partiendo de un valor de nivel estático; el cual, es un valor tomado durante el ensayo de laboratorio, para dicho cálculo se deben calcular las variables de la siguiente manera:

$$Q = \frac{P}{t * \rho} \quad (8)$$

Q = Caudal (m^3/s)

P = peso de agua (kg)

ρ = Densidad del agua kg/m^3

t = segundos (s)

Calculo de la velocidad:

$$v = \frac{Q}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (9)$$

Para la almenara donde:

$$K = \frac{2gZ_0}{V_0^2} \quad (10)$$

K = Coeficiente de Fricción (-)

g = gravedad ms^2

Z₀ = altura inicial (m)

V₀ = velocidad m/s

Calcular el valor de Z_{max} teórico mostrado en la ecuación (11) y compararlo con el valor de Z_{max} practico obtenido para cada caudal

$$Z = NFP + \frac{Lt * At}{K * Ac} \left(1 - e^{\frac{k * Ac}{Lt * At} (NFP - Z_0)}\right) \quad (11)$$

Donde:

Lt= Longitud de la tubería

At= Área de la tubería

K= Coeficiente de fricción

Ac= Área de la chimenea

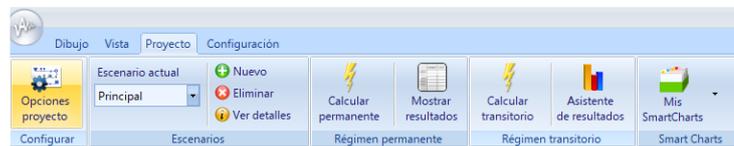
NFP= Nivel de flujo permanente

$$Z_{max} = Z + NE \quad (12)$$

2.4 MODELACION COMPUTACIONAL – SOFTWARE ALLIEVI

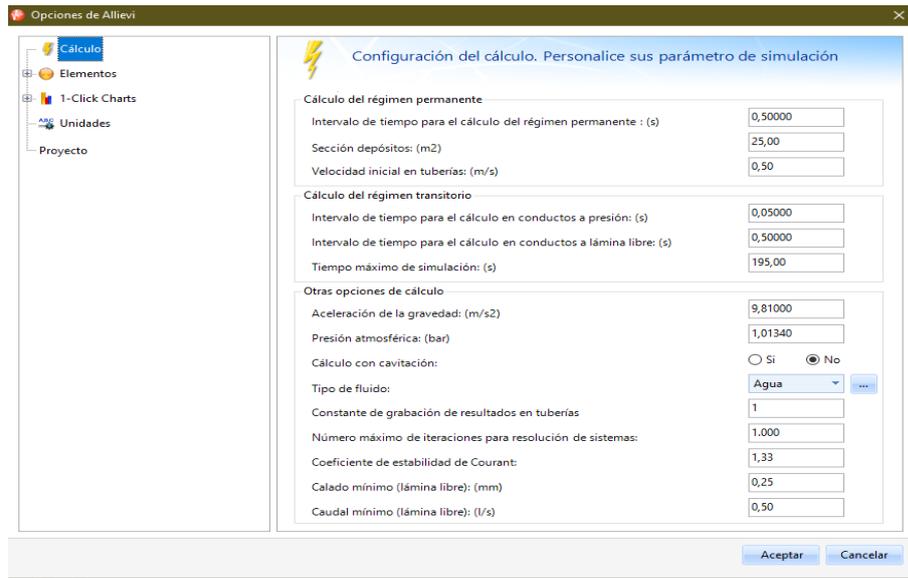
Como se ha mencionado antes, el programa permite la simulación de un flujo a través de una conducción con gravedad impulsada, por medio de tanque elevado o por estaciones de bombeo. Se recomienda que antes de empezar a dibujar se programen las opciones de cálculo y esto se muestra en la **Figura 17** y **Figura 18** correspondientemente.

Figura 17.Opciones de cálculo



Fuente: autor

Figura 18. Configuración de los cálculos



Fuente: autor

Es importante conocer los elementos que ofrece allievi para poder dibujar y con los cuales se harán las simulaciones, esto se puede apreciar en la **Figura 19**

Figura 19. Elementos del programa

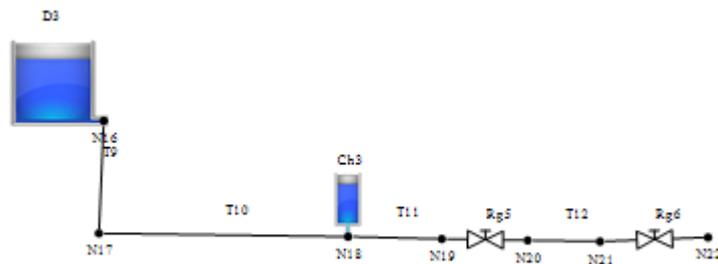
Tipos de Elemento	Representación Gráfica en ALLIEVI
1. Nudos	 Nudo
2. Depósitos	 N16 N17
3. Tuberías	 Tubería N14 N15
4. Estaciones de bombeo	 Bomba N10 N11
5. Estructuras de Protección	 N1 N2 N3
6. Estructuras de control de caudal	 Eq1 Eq2 N10 N11 N4 N5
7. Leyes de caudal (Q) o de altura (H)	 N12 N13
8. Turbinas Francis	 Tb1 N43 N44
9. Conductos en lámina libre	 Canal N14 N15

Fuente: autor

2.4.1 SIMULACIÓN DEL MONTAJE – ALMENARA

El dibujo que se realizó y con el cual se realizó la modelación se muestra en la **Figura 20**

Figura 20. Dibujo.



Fuente: autor

Cabe destacar, que el montaje es el mismo para la condición inicial, así en el dibujo aparezca la almenara, allievi ofrece la opción de apagar o dejar inactiva la almenara, de esta forma se puede simular como condición inicial. Para que el sistema montado pueda ser simulado, primero se debe hacer el régimen permanente, por lo cual se incluyeron los parámetros que exige el programa (cotas, materiales, dimensiones, coeficientes de pérdidas).

Figura 21. Cotas en los nodos

Nodos		
	Nombre	Cota (m)
	N16	0,2
	N17	0
	N18	0
	N19	0
	N20	0
	N21	0
	N22	0

Fuente: autor

Solo se incluyeron las cotas en donde muestran las uniones para los nodos, como se muestra en la **Figura 21**

Figura 22. Parámetros del reservorio

Depósitos - Datos básicos									Vertedero/Aliviadero				División y Vertedero				Aliviadero móvil			
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	L (m)	Z Cresta (m)	Cq	Descarga	Si (m ²)	Z Si (m)	Sf (m ²)	Z Sf (m)	Cresta	Zf (m)	Ti (s)	Tf (s)	
D3	---	N16	0,2	GD		0,62														

Fuente: autor

Para el depósito se escoge un de grandes dimensiones (GD), esto es a causa de que la cota de la superficie del agua en el reservorio es constante. Estos parámetros se muestran en la **Figura 22**

Figura 23. Coeficientes de pérdidas de la almenara

Calcular coeficientes de pérdidas menores de la chimenea Ch3

Cálculo de los coeficientes de pérdidas menores en el ramal de unión de la chimenea de equilibrio

El asistente permite el cálculo de los coeficientes de pérdidas menores de la chimenea seleccionada

Tubería de impulsión: 19,05 mm

Ramal de unión: 19,05 mm

Orificio de la chimenea: 19,05 mm

Chimenea: 0,022 m

Sin codos en ramal de unión

K de salida de la chimenea: 762349 m/(m³/s)²

K de entrada a la chimenea: 785876 m/(m³/s)²

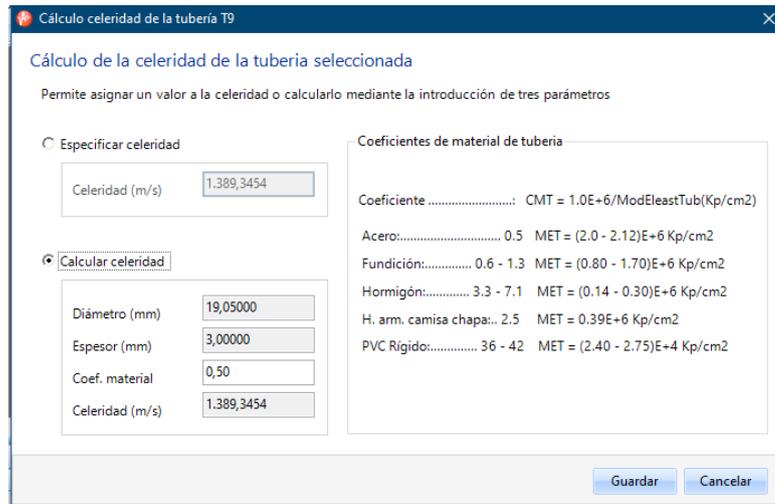
[Asistente avanzado](#)

Cancelar << >> Terminar

Fuente: autor

Para la almenara las pérdidas a la entrada y salida de esta estructura, el programa lo calcula automáticamente, sin embargo es necesario ingresar datos como el ramal de unión (mm), orificio de la almenara (mm), tubería de la impulsión (mm) y la almenara (m). Esto se muestra en la **Figura 23**.

Figura 24. Cálculo de la celeridad en las tuberías



Fuente: autor

Figura 25. Parámetros de las tuberías

	Tuberías - Datos básicos										Pérdidas		Caudal nulo	
	Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
T9	N16	0,2	N17	0	19,05	2	3	1389,3454	Calc.	----	0,15	0		
T12	N20	0	N21	0	19,05	2	3	1389,3454	Calc.	----	0,15	0,1		
T11	N18	0	N19	0	19,05	2	3	1389,3454	Calc.	----	0,15	0,1		
T10	N17	0	N18	0	19,05	2	3	1389,3454	Calc.	----	0,15	0,5		

Fuente: autor

Para el cálculo y datos registrados en las tuberías, el programa calcula automáticamente la celeridad, usando la ecuación anteriormente mostrada; de esta manera se creó las longitudes, diámetros internos, espesor de rugosidad y pérdidas de cada tramo que se reflejan en la **Figura 24** y **Figura 25**

Figura 26. Apertura de las válvulas de regulación



Fuente: autor

El programa ofrece la facilidad de regular las válvulas para el caudal, así como también poner estructuras de protección, con sección constante o variable para un régimen transitorio; la **Figura 26** muestra el cierre brusco de la válvula de bola (esférica) para simular el fenómeno de golpe de ariete.

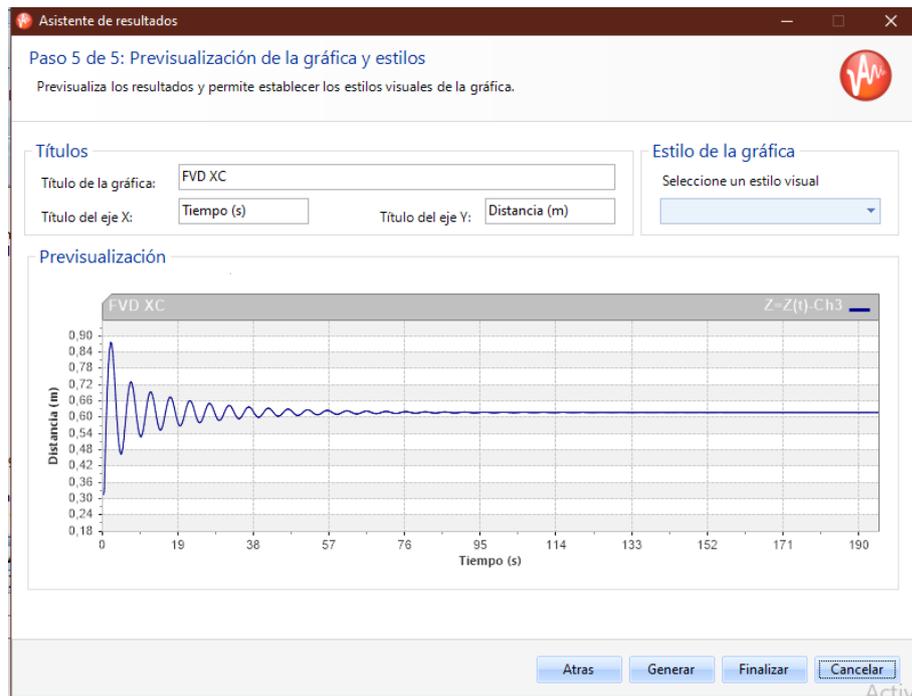
Figura 27. Parámetros de las válvulas de regulación

	Válvula Regulación - Datos básicos							Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $A_p(t) = A_{p0} + A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T + B)$				
	Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
Rg5	N19	N20	0	19,05	0,2	Esférica		Tabulada						
Rg6	N21	N22	0	19,05	0,3	De compuerta		Tabulada						

Fuente: autor

En la **Figura 27** se muestra las propiedades para las válvulas y se tabulan ambas para su funcionamiento dentro del flujo transitorio.

Figura 28. Grafica de cambios de alturas – Zmax y Zmin



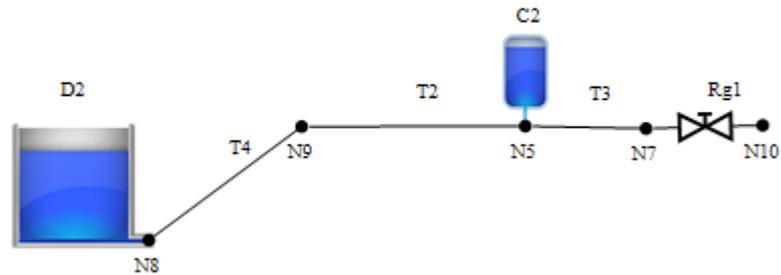
Fuente: autor

Siguiendo esto se calcula el régimen permanente primero y después el transitorio, donde es evidencia resultados, en los cuales, se muestran graficas de presiones, alturas, caudales y que para este caso nos interesa conocer la diferencia de las alturas que se registran en la almenara para fijar el Zmax que se presenta a causa del cierre busco de la válvula de bola. Esta grafica se muestra en **Figura 28**

2.4.2 SIMULACIÓN DEL MONTAJE – CÁMARA DE AIRE

El dibujo que se realizo para la simulación y análisis del comportamiento del golpe de ariete pero con una estructura de protección como lo son las cámaras de quiebre de presión o de aire se muestra en la **Figura 29**

Figura 29.Dibujo cámara de aire



Fuente: autor

Así mismo, como en el montaje anterior, donde la estructura de protección es la almenara, este montaje también sirve para analizarlo como caso base, es decir, el programa ofrece y tiene la opción de poder apagar el funcionamiento de la estructura de protección Para que el sistema montado pueda ser simulado, primero se debe hacer el régimen permanente, por lo cual se incluyeron los parámetros que exige el programa (cotas, materiales, dimensiones, coeficientes de pérdidas).

Figura 30.Parámetros del reservorio

Depósitos - Datos básicos								
Nombre	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar	
D2	---	N8	0	GD		35		

Fuente. Autor

Para el depósito se escoge uno de grandes dimensiones (GD), esto es a causa de que la cota de la superficie del agua en el reservorio es constante. Estos parámetros se muestran en la **Figura 30**

Figura 31. Coeficientes de pérdidas de la cámara de aire

Cálculo coeficientes de pérdidas del calderín C2

Cálculo de los coeficientes de pérdidas de salida y entrada al calderín
El asistente permite el cálculo de los coeficientes de pérdidas del calderín seleccionado

Número de calderines:

Diámetros

Tubería de impulsión: mm
 Ramal de unión: mm
 Conexión del calderín: mm

Ramal de unión

Sin by-pass Con by-pass
 Diámetro by-pass: mm

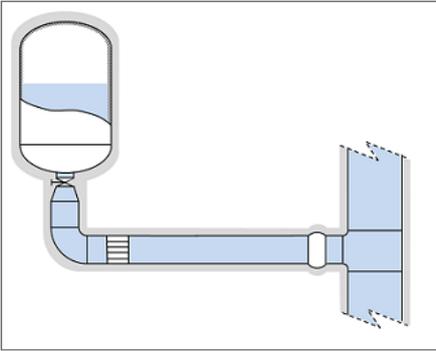
Disipador

No Placa orificio Tobera Si
 Diámetro: mm

K disipador flujo salida del calderín: m/(m³/s)²
 K disipador flujo entrada al calderín: m/(m³/s)²

Coefficientes salida | **Coefficientes entrada** | **Otros coeficientes**

Elemento	Asistente	Valor	Unidades
Conexión salida calderín	<input type="text" value="7,280"/>	<input type="text" value="7,280"/>	Adimensional
Cono ampl./reduc. en ramal	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
T ramal a by-pass (Qderiv=0)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Válvula de retención abierta	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
T ramal a tubería impulsión	<input type="text" value="1,090"/>	<input type="text" value="1,090"/>	Adimensional



Coefficientes finales

K de salida del calderín: m/(m³/s)² K de entrada al calderín: m/(m³/s)²

Fuente: autor

Para la cámara de aire las pérdidas a la entrada y salida de esta estructura, el programa los calculó automáticamente, sin embargo es necesario ingresar datos como el ramal de unión (mm), la conexión con la cámara (mm), tubería de impulsión (mm) y el número de cámaras de aire presentes en el sistema (m). Esto se muestra en la **Figura 31** y **Figura 32**.

Figura 32. Parámetros para la cámara de quiebre de presión

Calderines - Datos básicos						Características físicas del calderín									
Nombre	Nudo	Zu (m)	Num	Calc K	Act	D (m)	L (m)	V (m ³)	Pred	Rug (mm)	Zb (m)	Posición	Vejiga	P (bar)	EP
C2	N5	0	1	...	<input checked="" type="checkbox"/>	0,021	0,06	0	...	0,0015	0	Vertical	No	0	Calc. 1,2

Ramal de unión			Pérdidas	
D (mm)	L (m)	Rug (mm)	K sal	K ent
7,58	0,05	0,0015	231471800	283501000

Fuente: autor

Figura 33. Cálculo de la celeridad en las tuberías

Fuente: autor

Figura 34. Parámetros de las tuberías

Tuberías - Datos básicos										Pérdidas		Caudal nulo	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
T2	N9	0	N5	0	18,18	13	1,58	400	Calc.	0,0015	0,32		
T3	N5	0	N7	0	15,16	4	0,71	400	Calc.	0,0015	0,36		
T4	N8	0	N9	0	30,2	12	1,6	400	Calc.	0,0015	0,32		

Fuente: autor

Para el cálculo y datos registrados en las tuberías, el programa calcula automáticamente la celeridad, usando la ecuación expuesta anteriormente; de esta manera se añaden las longitudes, diámetros internos, espesor de rugosidad y pérdidas de cada tramo que se reflejan en la **Figura 33** y **Figura 34** respectivamente.

Figura 35. Apertura de las válvulas de regulación



Fuente: autor

El programa ofrece la facilidad de regular las válvulas para el caudal, así como también poner estructuras de protección con sección constante o variable para un régimen transitorio; la **Figura 35** muestra el cierre brusco de la válvula de bola (esférica) para simular el fenómeno de golpe de ariete.

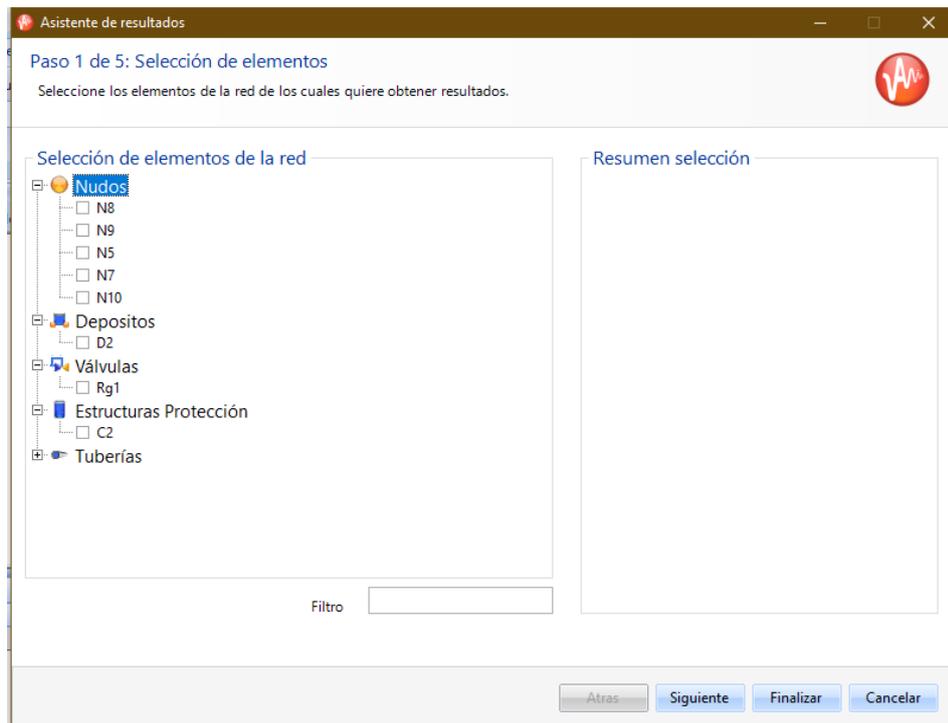
Figura 36. Parámetros de las válvulas de regulación

Válvula Regulación - Datos básicos								Maniobra	Tabulada	Sinusoidal: $A_p(t) = A_p0 + A * \text{sen}(2 * \text{Pi} * t / T + B)$			
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo	Tabla	Ap0(%)	A(%)	T(s)	B(grados)
Rg1	N7	N10	0	25,4	9,2	De globo		Tabulada					

Fuente: autor

En la **Figura 36** se muestra las propiedades para la válvula de este sistema y se tabula para su funcionamiento dentro del flujo transitorio.

Figura 37. Resumen y graficas de la cámara de aire



Fuente: autor

Siguiendo esto se calcula el régimen permanente primero y después el transitorio, donde se evidencia resultados en los cuales se muestran graficas de presiones, alturas, caudales para los diferentes componentes en el sistema, ya sean nodos, tuberías, tanques, válvulas y estructuras de protección. Esto se muestra en la **Figura 37**.

2.5 COMPARACIÓN Y COMPROBACIÓN

2.5.1 ALMENARA

En este sistema hidráulico se lleva a cabo dos procesos de comparación y comprobación, con los cuales, se busca encontrar una semejanza en los datos y resultados obtenidos a través de los diferentes métodos aplicados, dichos procesos son:

- Comparación y comprobación de los métodos por medio de las ecuaciones teóricas de Armin Schoklitsch y Allievi vs el modelo físico que se encuentra en el laboratorio y en el cual, se realizan los ensayos de laboratorio.

- Se compara y comprueba a través del fenómeno transiente que es obtenido, por medio de, el software Allievi vs el modelo físico en el que cual se realizan los ensayos de laboratorio.

2.5.2 CÁMARA DE AIRE

Para, el sistema hidráulico que está compuesto por la cámara de aire, se busca hacer la comparación y comprobación a través del fenómeno transiente simulado en el software Allievi vs el montaje físico en el que se realiza la toma de datos y ensayos de laboratorio.

3. RESULTADOS

3.1 MEDICIONES EN CAMPO DE LOS MODELOS FISICOS

3.1.1 MEDICIONES EN CAMPO DEL MODELO FISICO – ALMENARA

Los valores registrados en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia y tomados en el montaje de la almenara, se realizó mediante un proceso de toma de datos mientras el sistema se encontraba en funcionamiento, de tal manera, que se tuviera visualización de la variación del flujo presente en el sistema en el instante en el que se procedía a cerrar la válvula de globo, para generar así el golpe de ariete. De esta manera se realizó el procedimiento tres veces, cada una para un caudal diferente, en este caso, uno máximo, medio y mínimo. Así, se tomaron las alturas máximas y mínimas que oscilaron dentro de la almenara y apreciar el nivel máximo que se produce por la onda de sobrepresión. De esta manera en la **Tabla 2** se muestra el resumen de estos datos obtenidos para cada caudal y las alturas registradas en la variación del tiempo. Para obtener el valor del caudal se registraron tres valores de masa del agua y tiempos de llenado para lo cual se tienen los siguientes datos:

- Densidad del agua: 998,65 kg/m³
-

Tiempo	Masa	Temperatura
s	Kg	Cº
2	0,756	17,9
1,99	0,8	
2,127	0,79	

Con estos datos se calcula el volumen:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (13)$$

Para este caso se tienen tres valores de volumen como se muestra a continuación:

volumen	0,0007570	0,00080108	0,00079107
---------	-----------	------------	------------

Siiguiente a esto se calcula el caudal de la siguiente manera:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (14)$$

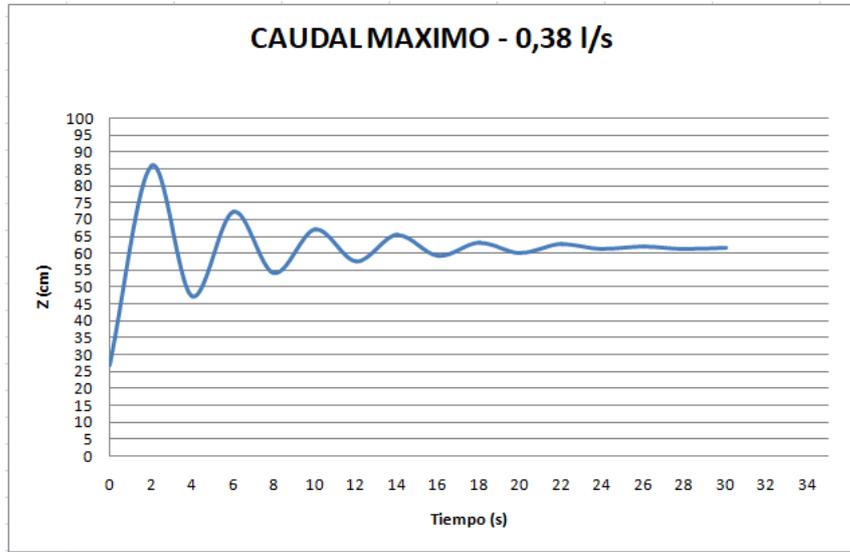
Este procedimiento se realizó para cada uno de los tiempos de llenado medidos, obteniendo así tres caudales diferentes, para lo cual se realiza un promedio de estos para obtener así el caudal que se va a emplear. Hay que destacar que este procedimiento se realizó tres veces para poder tener así los tres caudales de ensayo, uno máximo, medio y mínimo y que se registran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Datos registrados - altura (cm) vs tiempo (s)

caudal - 0,38 l/s		caudal - 0,35 l/s		caudal - 0,20 l/s	
z(cm)	t(s)	z(cm)	t (s)	z(cm)	t(s)
27	0	31,9	0	51,1	0
85,8	2	84,6	2	77,9	2
47,2	4	47,1	4	50,5	4
72,2	6	72,3	6	69,6	6
54,3	8	54,1	8	55,4	8
67,1	10	67,3	10	66,1	10
57,7	12	58,1	12	57,9	12
65,4	14	65	14	64,2	14
59,2	16	59,1	16	59,6	16
63,2	18	63,3	18	63,1	18
60,2	20	59,8	20	60,3	20
62,7	22	62,6	22	62,4	22
61,2	24	60,7	24	61	24
62,1	26	62	26	61,6	26
61,4	28	61,3	28	61,4	28
61,7	30	61,7	30	61,7	30

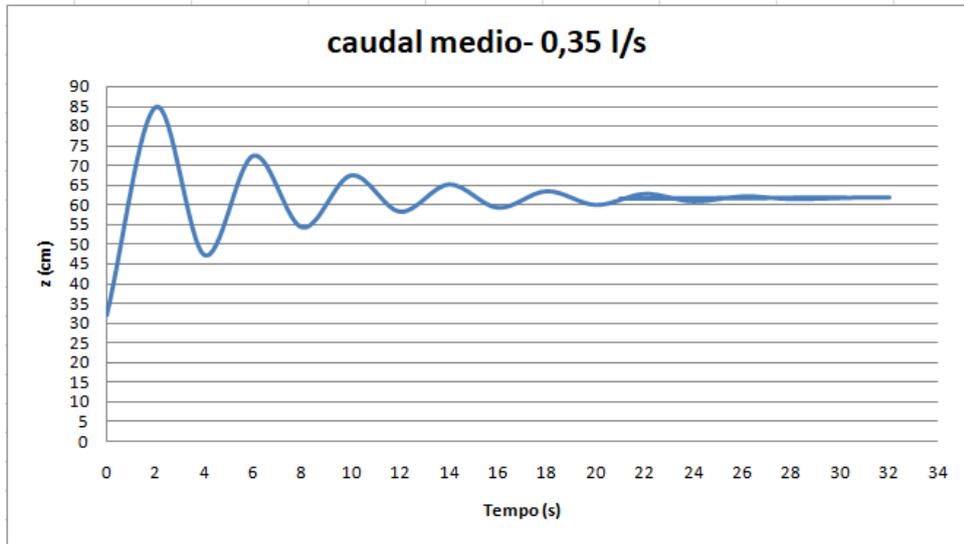
Fuente: autor

Figura 38. Onda de sobrepresión- Z max vs tiempo



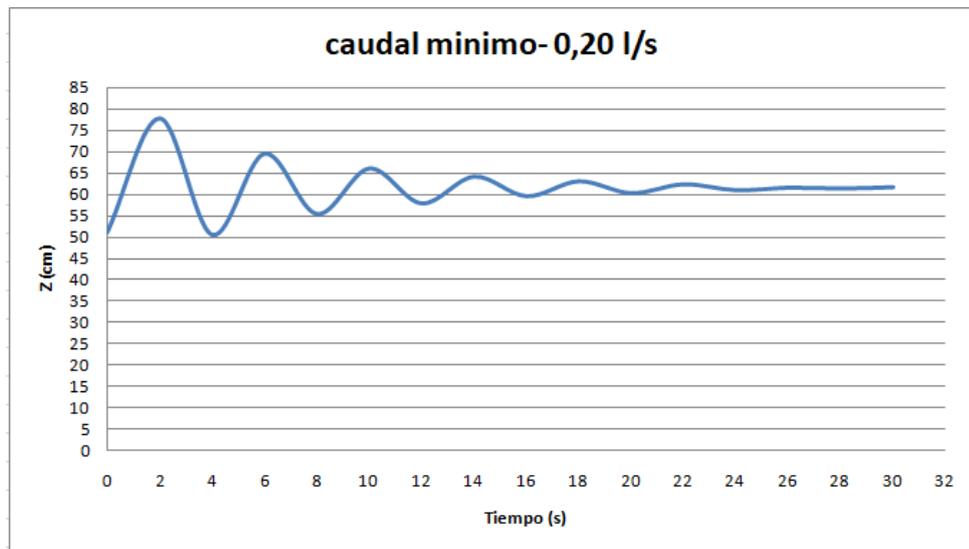
Fuente: autor

Figura 39. Onda de sobrepresión- Z max vs tiempo



Fuente: autor

Figura 40. Onda de sobrepresión- Z max vs tiempo



Fuente: autor

3.1.2 MEDICIONES EN CAMPO DEL MODELO FISICO – CÁMARA DE AIRE

Para obtener, los valores del montaje de la cámara de quiebre de presión y poder tener valores exactos y determinar cómo se comporta el fenómeno del golpe de ariete con este sistema, es necesario realizar varias mediciones y tomar varios datos, para los cuales, se escogen varios caudales, los cuales varían constantemente a lo largo de las pruebas, como así mismo, las diferentes cámaras de aire que son escogidas y con las cuales se puede trabajar en los ensayos de laboratorio. A continuación se muestra y evidencia tablas en las que aparecen los datos registrados y figuras o graficas en las que se muestra cómo se comporta el fenómeno en el sistema y se forma la onda de sobrepresión causada por el cierre repentino de la válvula de globo. También, se conocen los parámetros iniciales, como longitudes y diámetros de las cámaras de aire usadas y los caudales que son ensayados.

Tabla 3. Cámaras de aire

N°	DIAMETRO		LONGITUD (cm)
	PULGADAS	MILIMETROS (mm)	
1	1/2"	21	6
2	1/2"	21	11
3	1/2"	21	16
4	1/2"	21	21
5	1/2"	21	26

Fuente: autor

Tabla 4. Caudales de ensayo

caudal (l)	tiempo(s)	caudal (l/s)
5	30,94	0,162
10	32,95	0,303
13	18,07	0,719
15	18,97	0,791
17	18,59	0,914
20	18,56	1,078

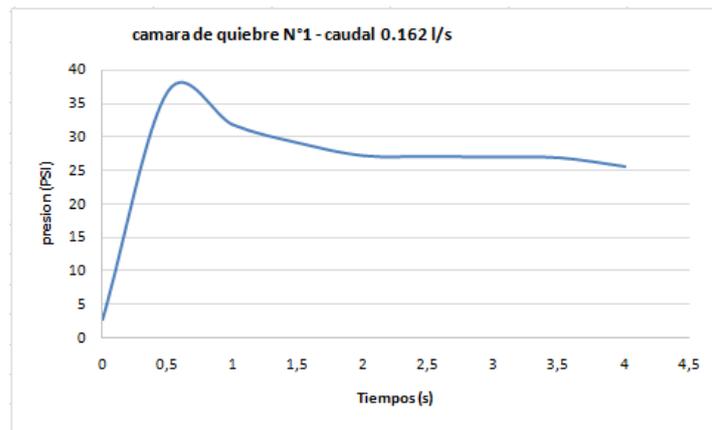
Fuente: autor

Tabla 5. Datos registrados cámara de aire N°1

camara de aire N° 1 - diametro 1/2" - 21 mm - longitud 6 cm											
caudal	0,162	caudal	0,303	caudal	0,719	caudal	0,791	caudal	0,914	caudal	1,078
presion (PSI)	tiempo (s)	presion (PSI)	tiempo(s)								
2,9	0	2,9	0	2,9	0	2,9	0	2,9	0	2,9	0
36,9	0,5	35,1	0,5	42,2	0,5	32,6	0,5	31,9	0,5	75,7	0,5
31,9	1	26,3	1	22,4	1	22,5	1	18	1	24,2	1
29,2	1,5	27,1	1,5	29,1	1,5	27	1,5	29,9	1,5	30,9	1,5
27,3	2	27	2	26,8	2	26,8	2	26,3	2	27,5	2
27,2	2,5	26,9	2,5	26,7	2,5	26,7	2,5	26,7	2,5	26,5	2,5
27,1	3	26,8	3	26,8	3			26,6	3	26,6	3
27	3,5	26,6	3,5	26,7	3,5			26,7	3,5	26,5	3,5
25,7	4							26,6	4	26,6	4

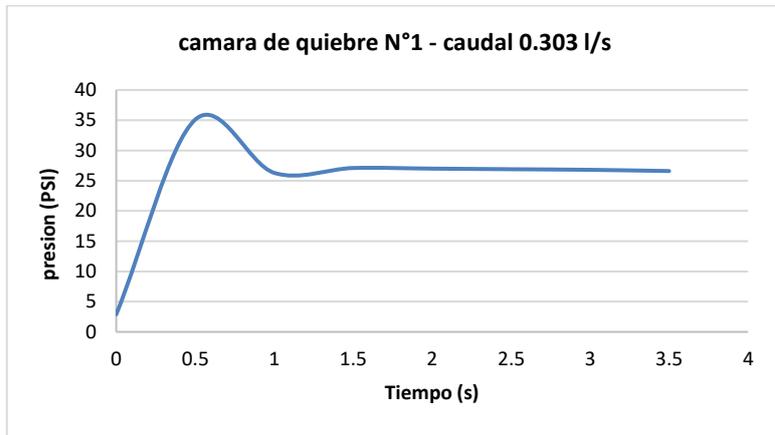
Fuente: autor

Figura 41. Cámara 1 - 0,162 l/s



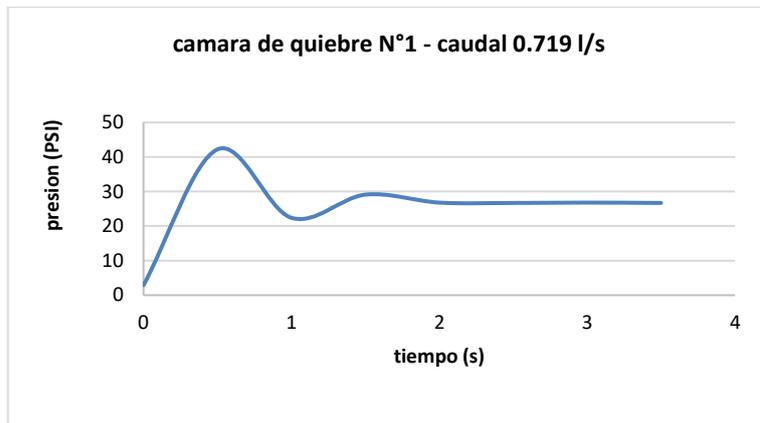
Fuente: autor

Figura 42. Cámara 1 - 0,303 l/s



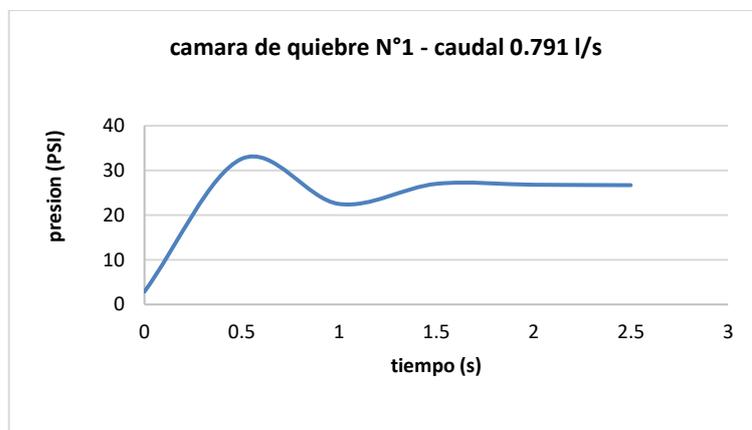
Fuente: autor

Figura 43. Cámara 1- 0,719 l/s



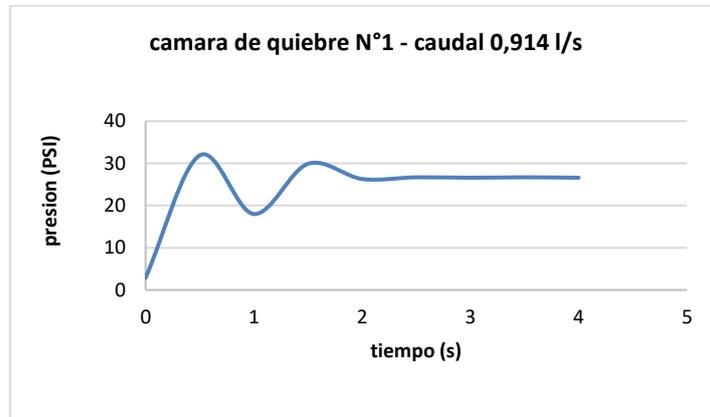
Fuente: autor

Figura 44. Cámara 1 - 0,791 l/s



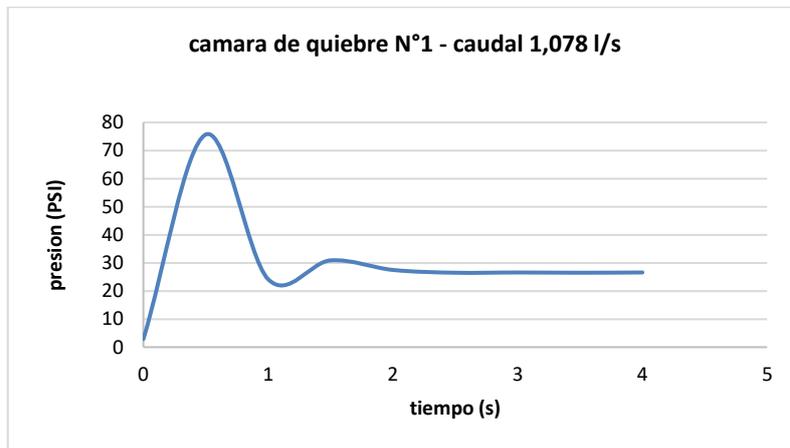
Fuente: autor

Figura 45. Cámara 1 - 0,914 l/s



Fuente: autor

Figura 46. Cámara 1 - 1,079 l/s



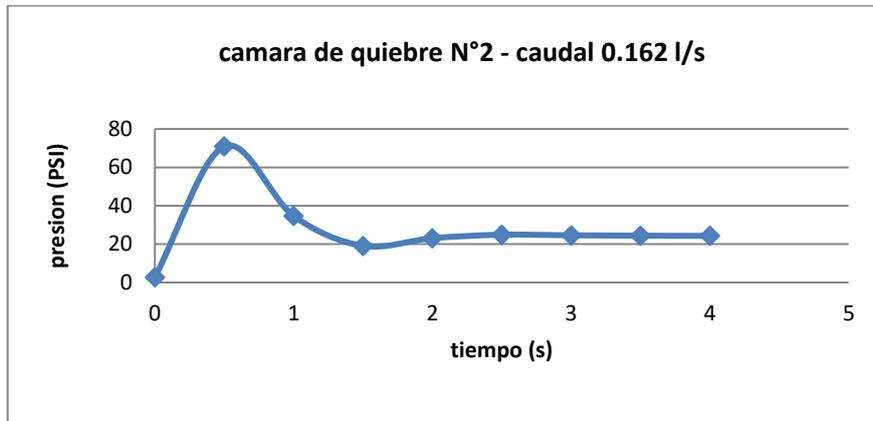
Fuente: autor

Tabla 6. Datos registrados cámara de aire N°2

camara de aire N° 2 - diametro 1/2" - 21 mm - longitud 11 cm											
caudal	0,162	caudal	0,303	caudal	0,719	caudal	0,791	caudal	0,914	caudal	1,078
presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)
2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0
70,9	0,5	39,4	0,5	26	0,5	36,9	0,5	60,1	0,5	27,6	0,5
34,7	1	35,3	1	37,2	1	28,5	1	10,6	1	23,4	1
19,1	1,5	17,5	1,5	18,2	1,5	20,9	1,5	18,9	1,5	24,3	1,5
23,1	2	23,1	2	23,1	2	24,3	2	26,7	2	24,4	2
24,9	2,5	25,1	2,5	24,8	2,5	24,4	2,5	24,6	2,5	24,2	2,5
24,6	3	24,6	3	24,7	3	24,2	3	24,3	3	24,3	3
24,4	3,5	24,5	3,5	24,6	3,5			24,2	3,5		
24,3	4	24,2	4	24,3	4						

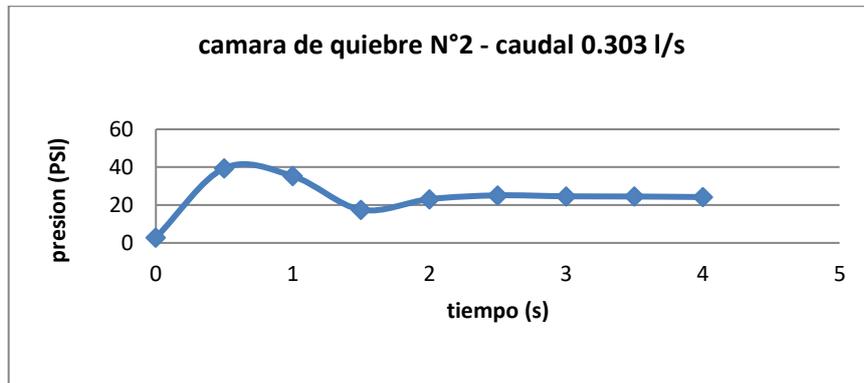
Fuente: autor

Figura 47. Cámara 2 - 0,162 l/s



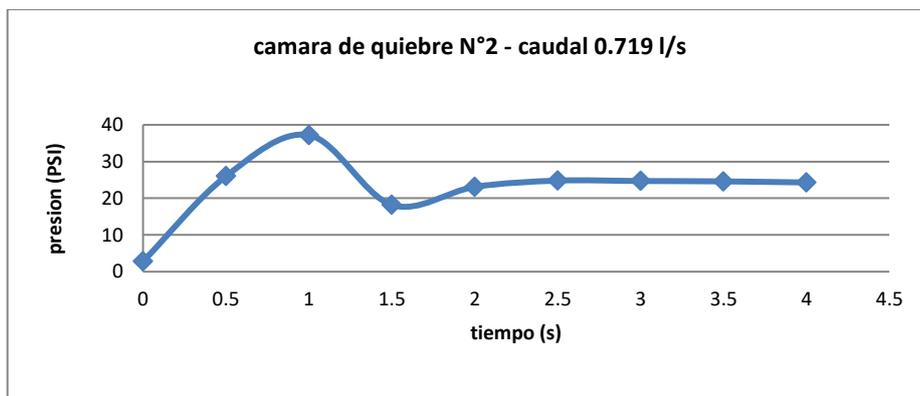
Fuente: autor

Figura 48. Cámara 2 - 0,303 l/s



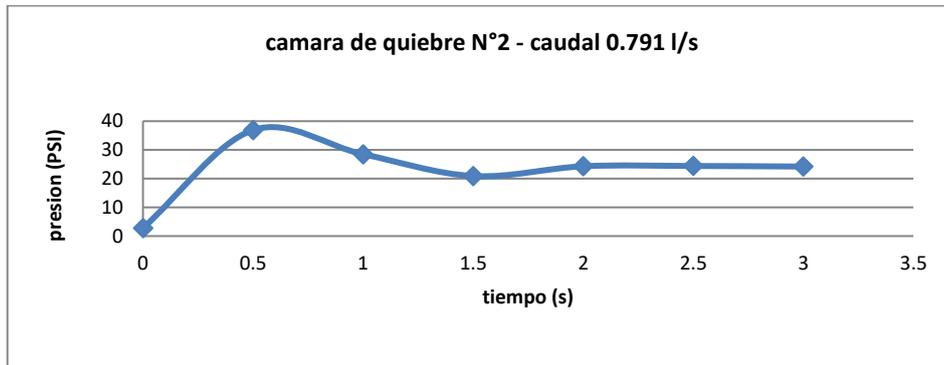
Fuente: autor

Figura 49. Cámara 2 - 0,719 l/s



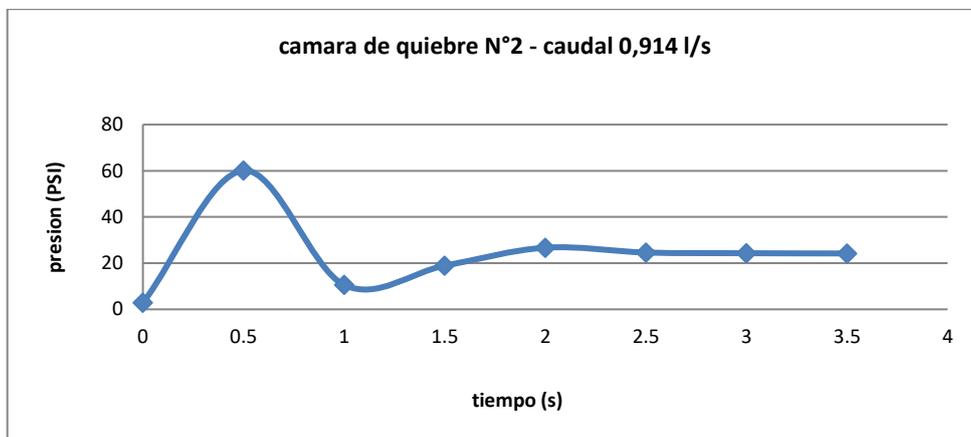
Fuente: autor

Figura 50. Cámara 2 - 0,791 l/s



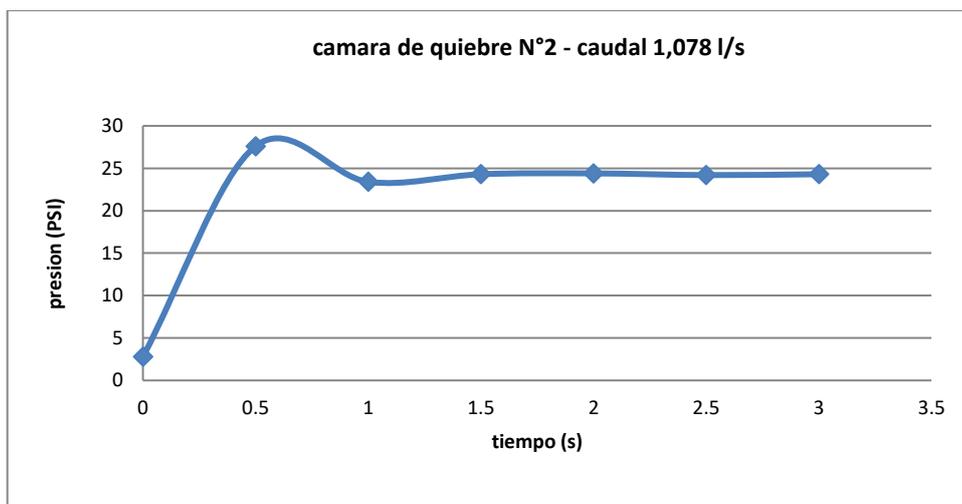
Fuente: autor

Figura 51. Cámara 2 - 0,914 l/s



Fuente: autor

Figura 52. Cámara 2 - 1,078 l/s



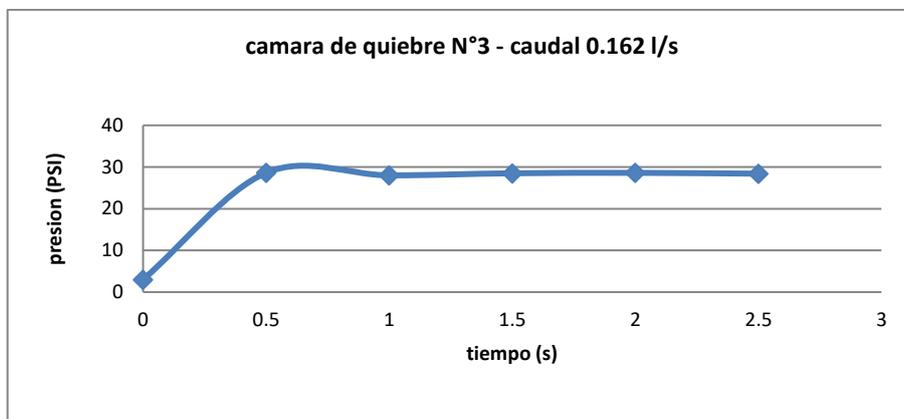
Fuente: autor

Tabla 7. Datos registrados cámara de aire N°3

camara de aire N° 3 - diametro 1/2" - 21 mm - longitud 16 cm											
caudal	0,162	caudal	0,303	caudal	0,719	caudal	0,791	caudal	0,914	caudal	1,078
presion (PSI)	tiempo (s)	presion (PSI)	tiempo (s)	presion (PSI)	tiempo (s)	presion (PSI)	tiempo (s)	presion (PSI)	tiempo (s)	presion (PSI)	tiempo (s)
3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0
28,6	0,5	76,7	0,5	29,1	0,5	35,4	0,5	32,7	0,5	45,7	0,5
28	1	30,6	1	27,6	1	26	1	25	1	28,9	1
28,5	1,5	29,2	1,5	28,4	1,5	28,4	1,5	28,1	1,5	28,1	1,5
28,6	2	28,8	2	28,3	2	28,3	2	28,2	2	28	2
28,4	2,5	28,7	2,5	28,2	2,5	28,2	2,5	28,1	2,5	28,1	2,5
		28,6	3							28	3
		28,5	3,5							28,1	4
										28	4,5

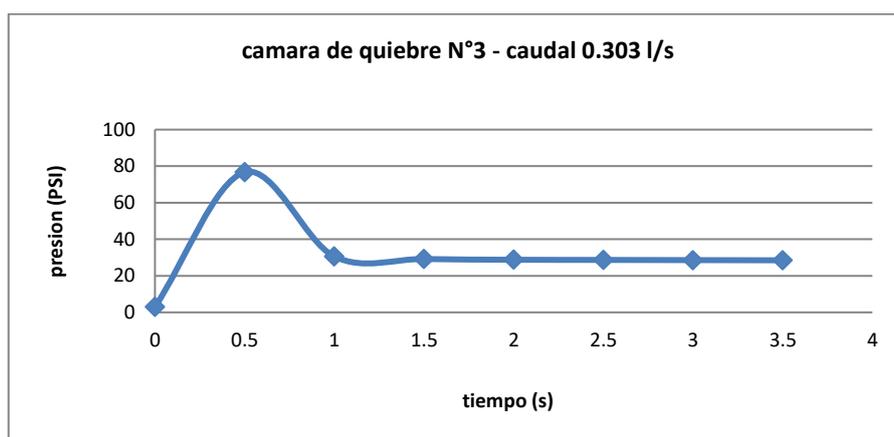
Fuente: autor

Figura 53. Cámara 3 - 0,162 l/s



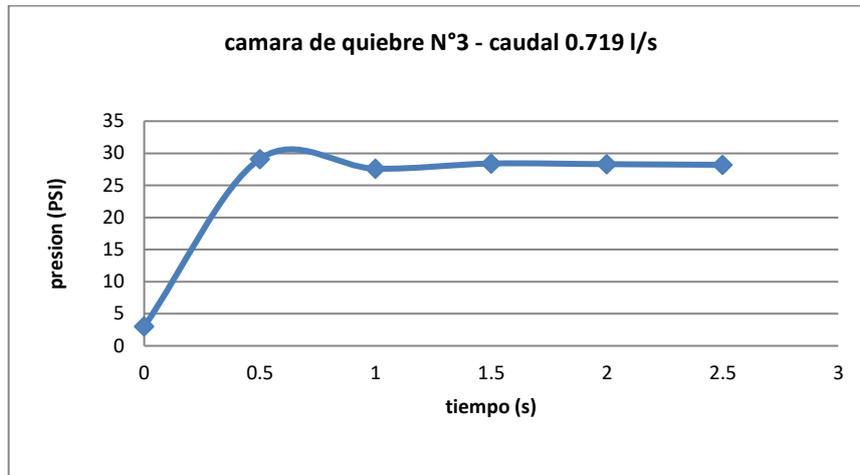
Fuente: autor

Figura 54. Cámara 3 - 0,303 l/s



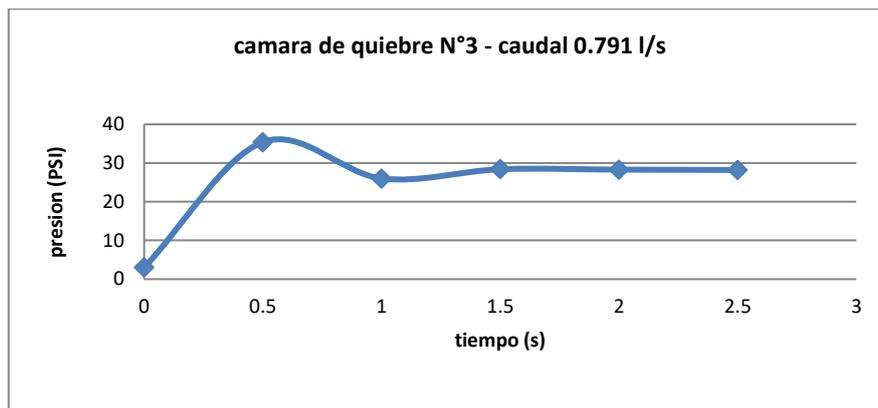
Fuente: autor

Figura 55. Cámara 3 - 0,719 l/s



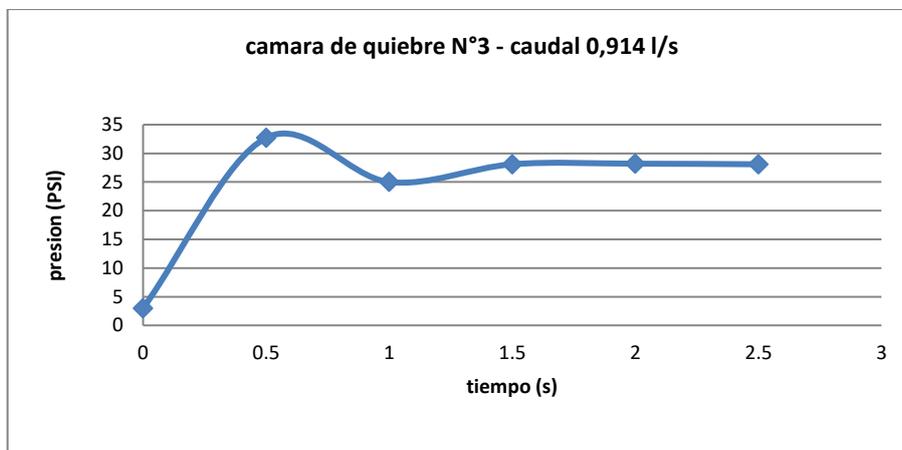
Fuente: autor

Figura 56. Cámara 3 - 0,791 l/s



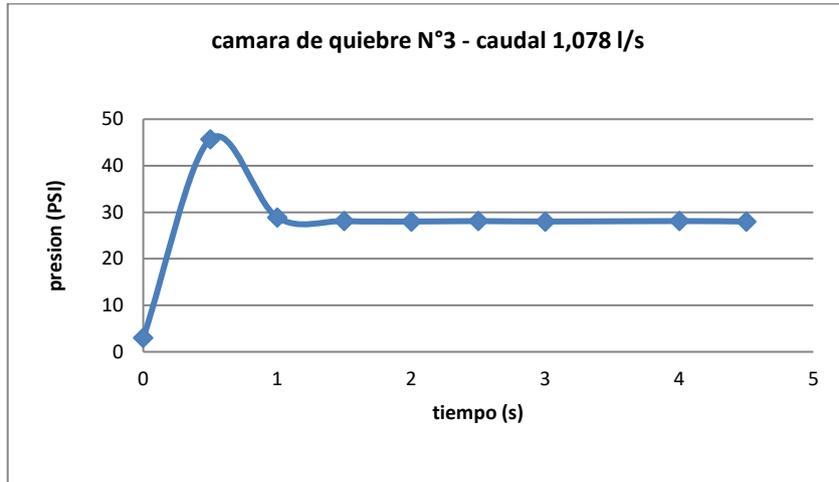
Fuente: autor

Figura 57. Cámara 3 - 0,914 l/s



Fuente: autor

Figura 58. Cámara 3 - 1,078 l/s



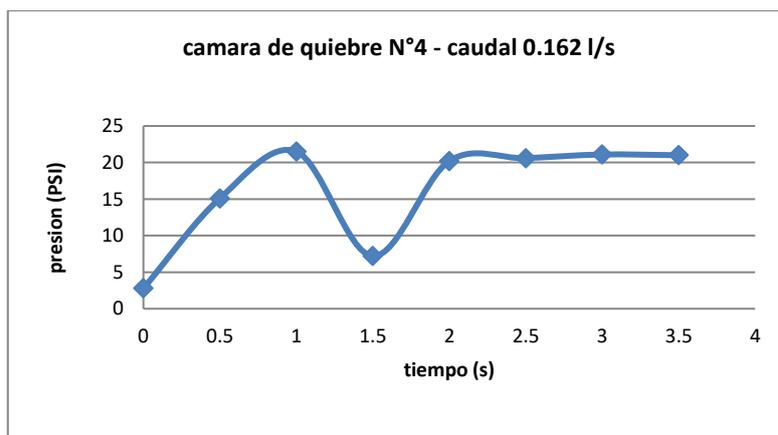
Fuente: autor

Tabla 8. Datos registrados cámara de aire N°4

camara de aire N°4 - diametro 1/2" - 21 mm - longitud 21 cm											
caudal	0,162	caudal	0,303	caudal	0,719	caudal	0,791	caudal	0,914	caudal	1,078
presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)
2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0
15,1	0,5	24,9	0,5	26,8	0,5	21	0,5	25,4	0,5	45	0,5
21,5	1	14,3	1	14,4	1	15,1	1	16,4	1	13,9	1
7,2	1,5	20	1,5	25,4	1,5	19,8	1,5	20,1	1,5	25	1,5
20,2	2	21,2	2	19,6	2	20,9	2	21	2	20,3	2
20,6	2,5	21	2,5	21,3	2,5	21,1	2,5	21,2	2,5	21,3	2,5
21,1	3	21,1	3	21,2	3	21,2	3	21,1	3	21,1	3
21	3,5			21,3	3,5	21,1	3,5			21,2	3,5
				21,2	4	21,2	4			21,1	4

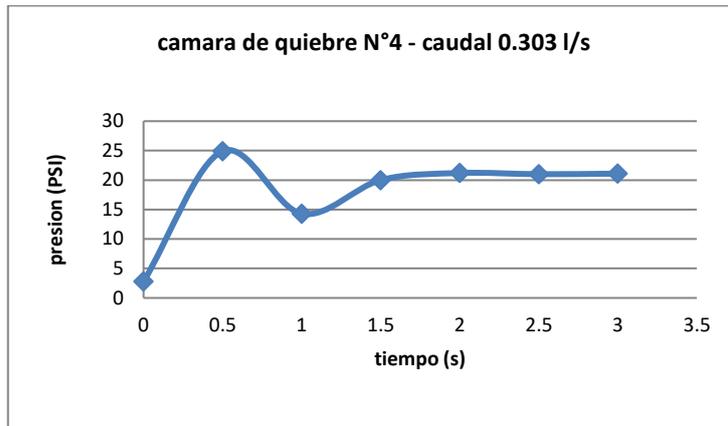
Fuente: autor

Figura 59. Cámara 4 - 0,162 l/s



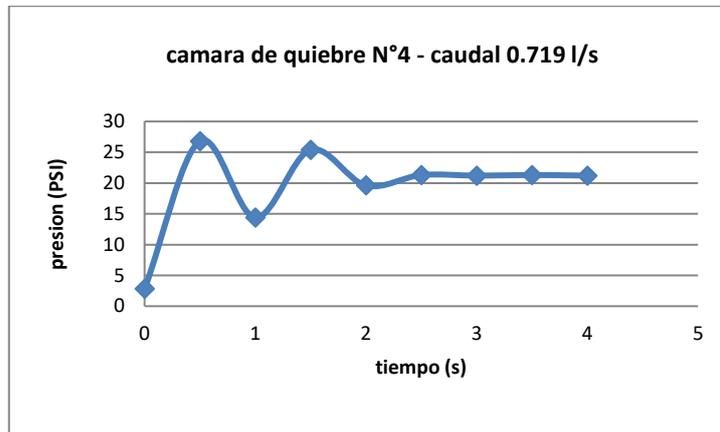
Fuente: autor

Figura 60. Cámara 4 - 0,303 l/s



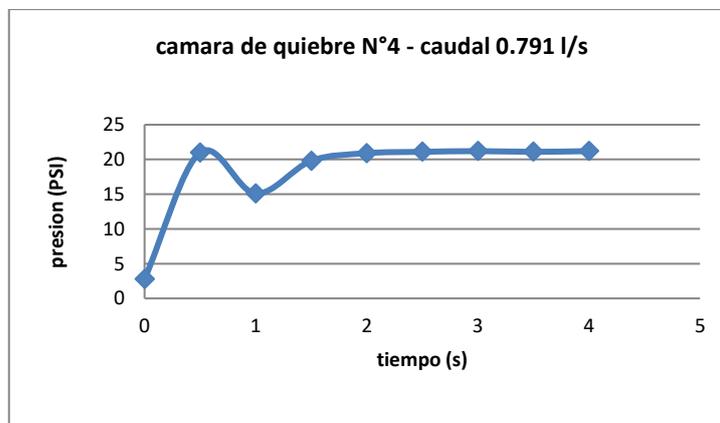
Fuente: autor

Figura 61. Cámara 4 - 0,719 l/s



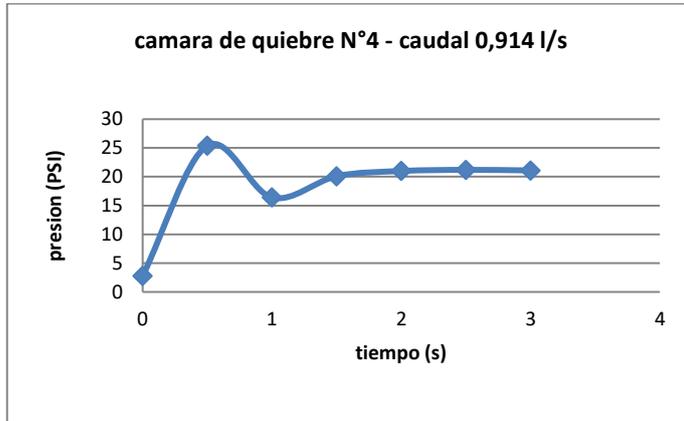
Fuente: autor

Figura 62. Cámara 4 - 0,791 l/s



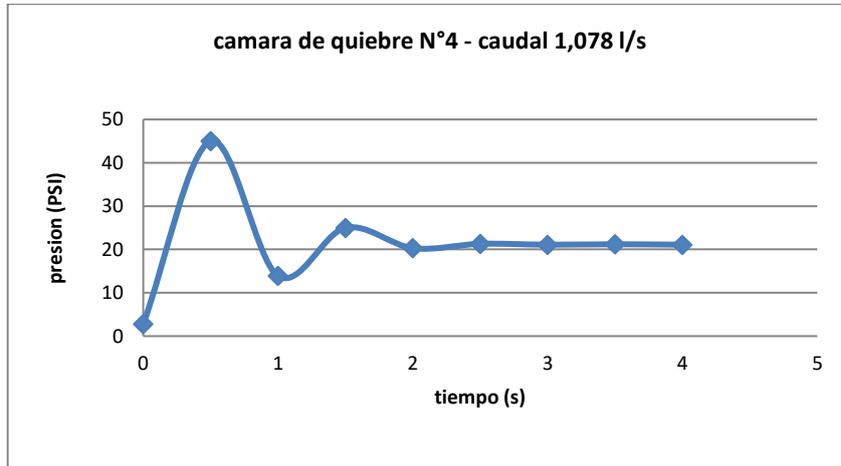
Fuente: autor

Figura 63. Cámara 4 - 0,914 l/s



Fuente: autor

Figura 64. Cámara 4 - 1,078 l/s



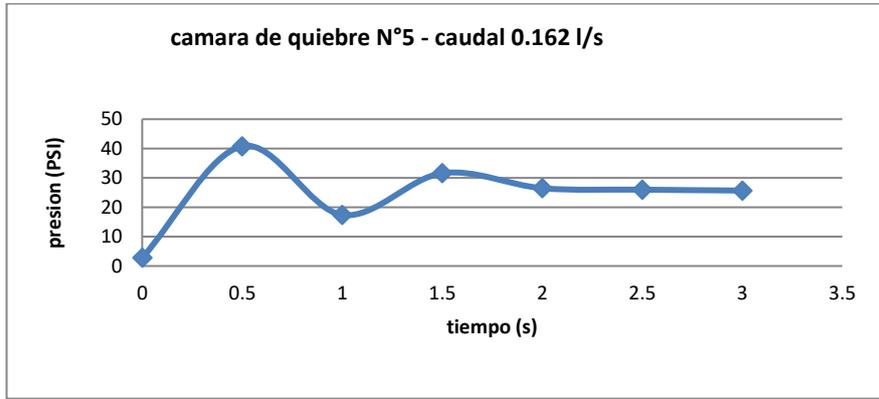
Fuente: autor

Tabla 9. Datos registrados cámara de aire N°5

camara de aire N° 5 - diametro 1/2" - 21 mm - longitud 26 cm											
caudal	0,162	caudal	0,303	caudal	0,719	caudal	0,791	caudal	0,914	caudal	1,078
presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)	presión (PSI)	tiempo (s)
2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0
40,8	0,5	52,1	0,5	26,1	0,5	52,7	0,5	26,7	0,5	49,2	0,5
17,4	1	30,1	1	18,2	1	19,4	1	15,5	1	17,2	1
31,6	1,5	25,2	1,5	23,5	1,5	31,5	1,5	22,7	1,5	23,1	1,5
26,5	2	26,3	2	26,8	2	26,5	2	22,3	2	22,8	2
26	2,5	25,6	2,5	25,8	2,5	26,6	2,5	25,5	2,5	25,8	2,5
25,7	3			25,7	3	25,8	3	25,4	3	25,7	3
				25,6	3,5	25,7	3,5			25,6	3,5
						25,6	4			25,5	4

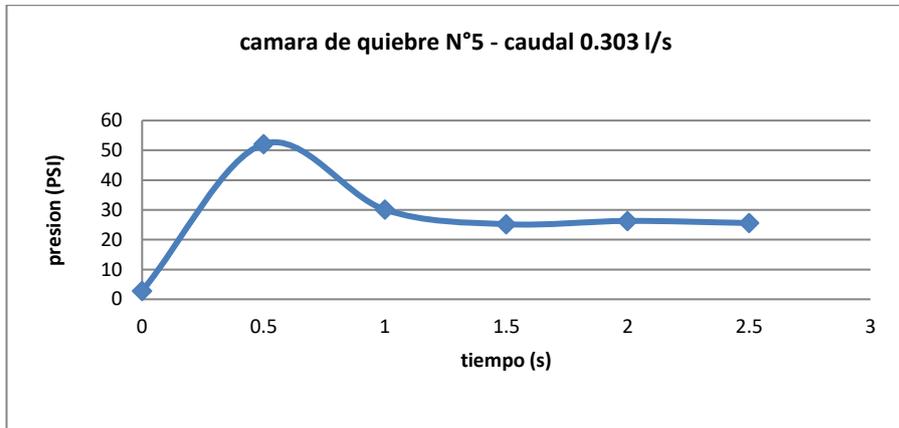
Fuente: autor

Figura 65. Cámara 5 - 0,612 l/s



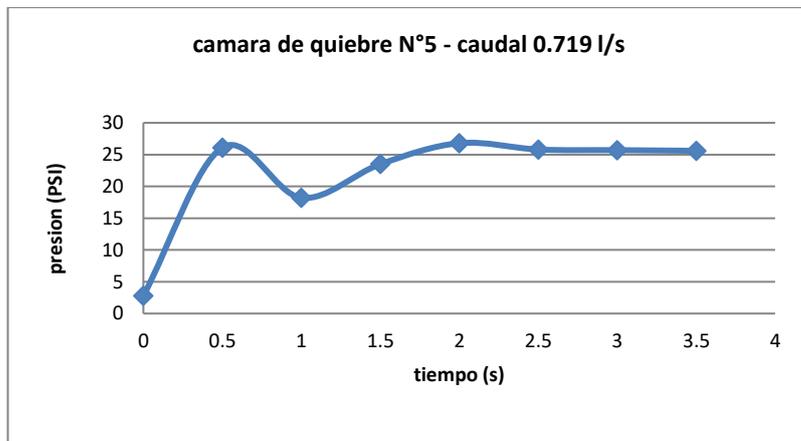
Fuente: autor

Figura 66. Cámara 5 - 0,303 l/s



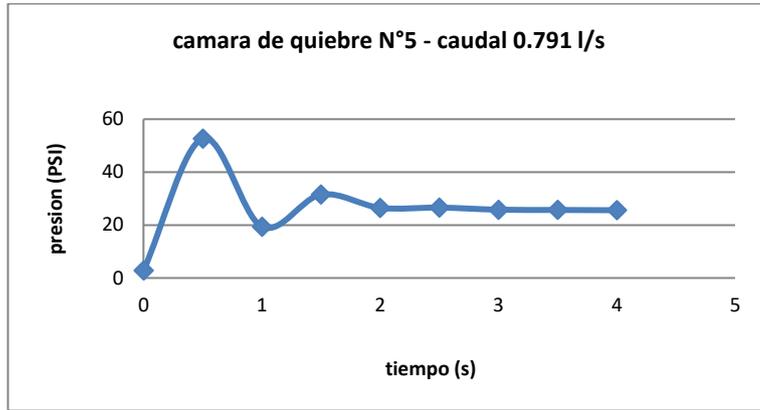
Fuente: autor

Figura 67. Cámara 5 - 0,719 l/s



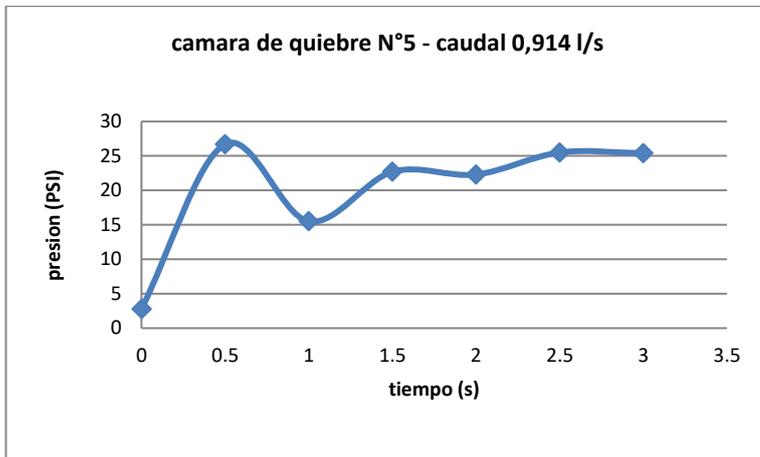
Fuente: autor

Figura 68. Cámara 5 - 0,791 l/s



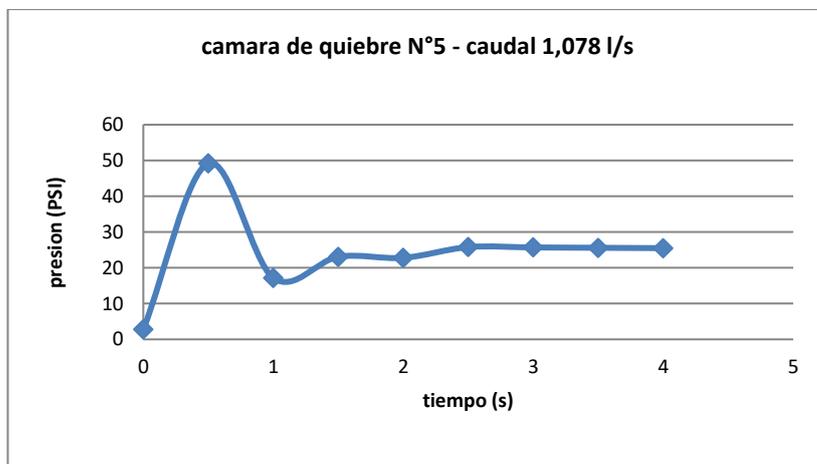
Fuente: autor

Figura 69. Cámara 5 - 0,914 l/s



Fuente: autor

Figura 70. Cámara 5 - 1,078 l/s



Fuente: autor

3.2 CALCULO DE LAS PERDIDAS EN EL SISTEMA

Para el cálculo de las pérdidas se tienen los siguientes datos de entrada:

- Caudal: 0,38 l/s
- Altura estática: 1,8 m
- Velocidad: 1,43 m/s
- Diámetro de la tubería: 0,0254 m (1")

Para esto es necesario emplear la siguiente ecuación:

$$H_f = f \frac{l}{D} + \frac{V^2}{2g}$$

Para efectuar la ecuación anterior es necesario conocer el factor f y para esto es necesario hacer un proceso de iteración para obtenerlo a través de la siguiente ecuación:

$$f = -2 \log \left(\frac{ks}{3,7d} + \frac{V^2}{2g} \right) f$$

Dado que el material de la tubería es PVC el ks que le corresponde a este material es de 0,0015 mm para lo cual se tiene que:

$$f = -2 \log \left(\frac{1,5 \times 10^{-6}}{3,7(0,0254)} + \frac{2,51}{27226\sqrt{f}} \right) f$$

$$f = 0,14$$

Obteniendo este valor f , se calcula el valor de las pérdidas por fricción en la tubería:

$$H_f = 0,14 + \frac{1,8}{0,0254} + \frac{1,435^2}{2(9,81)}$$

$$H_f = 1,38 \text{ m}$$

Para el cálculo de las pérdidas menores se tiene la siguiente ecuación:

$$H_m = K_m \frac{v^2}{2g}$$

El factor k_m es el coeficiente de los accesorios en las tuberías, que para este caso tiene un valor de 0,8

$$Hm = 0,8 \frac{1,435^2}{2(9,81)} = 0,84$$

El cálculo total de las pérdidas generadas en el sistema hidráulico se da de la siguiente manera:

$$HT = Hf + Hm$$

$$HT = 1,38 + 0,84$$

$$HT = 2,22 \text{ m}$$

3.3 RESULTADOS DEL METODO NUMERO Y TEORICO DE ARMIN SCHOKLITSCH A PARTIR DE ECUACIONES

Tabla 10. Valores del sistema ensayado

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Gravedad	9,809	m/s ²
Densidad del agua	998,29	kg/m ³
Diámetro de la tubería	0,01905	m
Área de la tubería	0,000285023	m ²
Ev agua	223000000	kg/m ²
E Young hierro galvanizado	10545000000	kg/m ²
Espesor de la tubería	0,003	m
Longitud tubería	3,06	m
Diámetro chimenea	0,01905	m
Área chimenea	0,000285023	m ²
Viscosidad dinámica (n)	0,001003	kg/ms

Fuente: autor

Se calcula el factor del coeficiente de fricción k:

$$K = \frac{2 (9,809)(0,27)}{1,256} = 4,21$$

Posteriormente a esto, se calcula el valor del Z max por medio de este método, para lo cual se obtienen los siguientes valores:

$$Ac = \pi \frac{(\text{diametro de la almenara})^2}{4}$$

$$Ac = \pi \frac{(0,0915)^2}{4} = 0,00028 \text{ m}^2$$

$$At = \pi \frac{(\text{diametro de la tubería})^2}{4}$$

$$At = \pi \frac{(0,01905)^2}{4} = 0,000285 \text{ m}^2$$

$$Zo = Z \text{ max} - Z \text{ min}$$

$$Zo = 0,858 - 0,617 = 0,241$$

Ahora se reemplazan estos valores en la siguiente ecuación:

$$Z = 0,27 + \frac{3,06(0,000285)}{4,21(0,000285)} \left(1 - e^{\frac{4,21(0,000285)}{3,06(0,000285)}(27-0,241)}\right)$$

$$= 0,2076 \text{ m}$$

Siguiente a esto, y sabiendo que el nivel estático es de 0,617 m, se realiza el siguiente procedimiento:

$$Z \text{ max} = 0,2538 + 0,617 = 0,8708 \text{ m}$$

Este procedimiento del método teórico se realizó para las mediciones de los otros dos caudales, el medio y el mínimo y los resultados se compilaron y en la **Tabla 11**

Tabla 11. Tabla de resumen método teórico

tabla de resumen						
Q	nivel de flujo (m)	Caudal (m3/s)	K coeficiente de fricción	Nivel estatico	Z (m)	Z max teorico
1	0,27	0,000384327	4,217245223	0,617	0,2076	0,8246
2	0,319	0,000352468	4,982597134	0,617	0,2263	0,8433
3	0,511	0,000202263	7,98152707	0,617	0,1673	0,7843

Fuente: autor

3.4 RESULTADOS DE LA MODELACION COMPUTACIONAL EN EL SOFTWARE ALLIEVI

3.4.1 RESULTADOS DE LA MODELACION – MONTAJE ALMENARA

Los resultados aquí mostrados, son los arrojados por el software Allievi en el régimen permanente y transitorio, estos resultados son obtenidos a través de los datos que se ingresaron de acuerdo a la topología y características del montaje físico en el que se realizó el ensayo. Se muestran los resultados de manera independiente, tanto para régimen permanente, como para el régimen transitorio. Se muestran pues las presiones generadas en cada uno de los nudos como se muestra en la **Tabla 12**

Tabla 12. Presión en los nudos – caudal 0,38 l/s

	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	N15_fin	0.62	0.42
2	N16	0.62	0.42
3	N17	0.60	0.60
4	N18	0.43	0.43
5	N18_fin	0.43	0.00
6	N19	0.41	0.41
7	N20	0.22	0.22
8	N21	0.19	0.19
9	N22	0.00	0.00

Fuente: autor

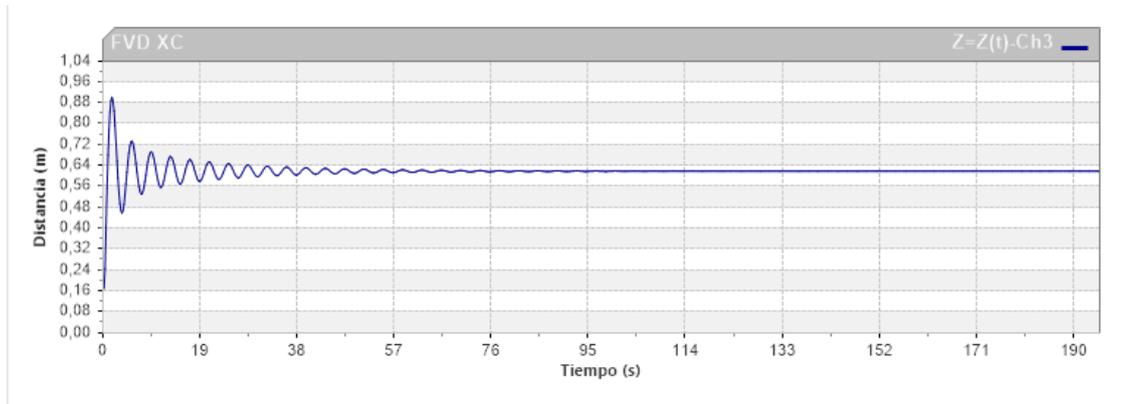
De esta manera, se muestra el caudal que fluye por el sistema y por cada tubería dibujada, para el cual según el programa es un valor de 0,38 l/s donde también se muestran las velocidades y pérdidas en cada una de las tuberías. Esta información se muestra en la **Tabla 13**

Tabla 13. Caudal en las tuberías

	Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
1	T9	0.38	1.34	0.03838	0.04	0.00	0.00	0	
2	T10	0.38	1.34	0.03838	0.37	0.05	0.00	0	
3	T11	0.38	1.34	0.03838	0.04	0.01	0.00	0	
4	T12	0.38	1.34	0.03838	0.06	0.01	0.00	0	

Fuente: autor

Figura 71. Onda de sobrepresión - caudal 0,38 l/s



Fuente: autor

Hay que mencionar que los resultados anteriormente mostrados pertenecen al caudal máximo ensayado el cual es de 0,38 l/s. De esta misma manera, se realizó el procedimiento para el caudal medio de 0,35 l/s y para el caudal mínimo de 0,20 l/s. Así se muestran pues los resultados obtenidos para cada uno de estos caudales, mostrando las presiones en nodos, caudales y velocidades que circulan por las tuberías, nivel de flujo en la almenara, apertura de válvulas, para régimen permanente y para el régimen transitorio se muestran los Z máx, nivel estático y figuras que muestran el comportamiento del fenómeno.

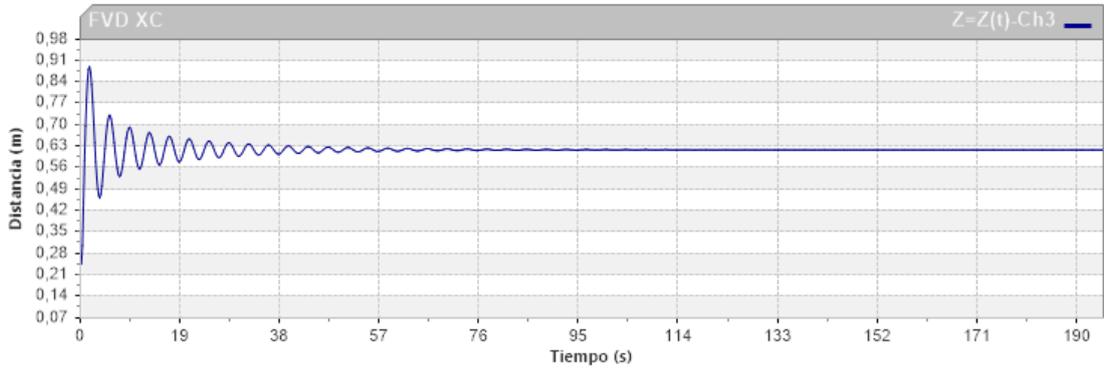
➤ Caudal – 0,35 l/s

Tabla 17. Presión en los nodos - caudal 0,35 l/s

	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	N15_fin	0,62	0,42
2	N16	0,62	0,42
3	N17	0,59	0,59
4	N18	0,24	0,24
5	N18_fin	0,24	0,00
6	N19	0,21	0,21
7	N20	0,13	0,13
8	N21	0,08	0,08
9	N22	0,00	0,00

Fuente: autor

Figura 72. Onda de sobrepresión -caudal 0,35 l/s



Fuente: autor

➤ Caudal – 0,20 l/s

Tabla 22. Presión en los nodos - caudal 0,20 l/s

	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	N15_fin	0,62	0,42
2	N16	0,62	0,42
3	N17	0,61	0,61
4	N18	0,49	0,49
5	N18_fin	0,49	0,00
6	N19	0,48	0,48
7	N20	0,25	0,25
8	N21	0,23	0,23
9	N22	0,00	0,00

Fuente: autor

Tabla 23. Caudal en las tuberías

	Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
1	T9	0,20	0,70	0,04076	0,01	0,00	0,00	0	
2	T10	0,20	0,70	0,04076	0,11	0,01	0,00	0	
3	T11	0,20	0,70	0,04076	0,01	0,00	0,00	0	
4	T12	0,20	0,70	0,04076	0,02	0,00	0,00	0	

Fuente: autor

Fuente: autor

3.4.2 RESULTADOS DE LA MODELACION – MONTAJE CÁMARA DE AIRE

Como se muestra anteriormente, en la **Figura 29** la cual, muestra el montaje de la cámara de aire en el software allievi, se muestra a continuación, los resultados arrojados por este, donde al igual que en el sistema de la almenara, se calcula primero el régimen permanente, obteniendo así, resultados de presiones en cada uno de los nodos, caudales y velocidades que circulan por el sistema de tuberías, datos y propiedades de la estructura de protección (cámara de aire o quiebre de presión) y la regulación de las válvulas; siguiente a esto, se calcula el régimen transitorio, en el cual se evalúa la altura máxima (Z max) generada en este sistema y una grafica donde se muestra el comportamiento del fenómeno y la generación de la onda de sobrepresión. Las presiones en los nodos se evidencian en la **Tabla 27**.

Tabla 27. Presión en los nodos

	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	N5	17.02	17.02
2	N5_fin	17.02	16.98
3	N7	4.11	4.11
4	N10	0.00	0.00
5	N7_fin	35.00	35.00
6	N8	35.00	35.00
7	N9	33.64	33.64

Fuente: autor

Para este caso montado, se obtienen valores de caudal de 1,25, no siendo un valor muy alejado al caudal mayor ensayado en laboratorio el cual es de 1,079, dichos resultados, se muestran con mayor claridad en la **Tabla 28**

Tabla 28. Caudal en las tuberías

	Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)	Pérd.men. (m)	Cel (m/s)	Tramos	L max. aire(m)
1	T2	1.25	4.82	0.01917	16.25	0.38	0.00	0	
2	T3	1.25	6.93	0.01860	12.03	0.88	0.00	0	
3	T4	1.25	1.75	0.02115	1.31	0.05	0.00	0	

Fuente: autor

Tabla 29. Nivel de flujo en la cámara de aire

	Nombre	Nivel (m)	Vol. gas (m3)
1	C2	0.04	0.000

Fuente: autor

De esta manera, se muestra el nivel de flujo que se encuentra dentro de la estructura de protección, que para este caso es la cámara de aire, dicho dato se encuentra registrado en la **Tabla 29**.

Para régimen permanente es necesario que la apertura de la válvula se encuentre al 100%, en régimen transitorio es cuando se dará lugar a su respectivo cierre donde se generara el golpe de ariete. Véase **Tabla 30**

Tabla 30. Apertura de la válvula

	Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
1	Rg1	1	1.25	4.11	100.00

Fuente: autor

Para régimen transitorio se toman los valores de Zmax y el nivel estático, este hace referencia al momento cuando el sistema se estabiliza, cuando entra en equilibrio nuevamente después de haberse generado el golpe de ariete. Véase **Tabla 31**

Tabla 31. Calculo del transitorio - Zmax y nivel estático

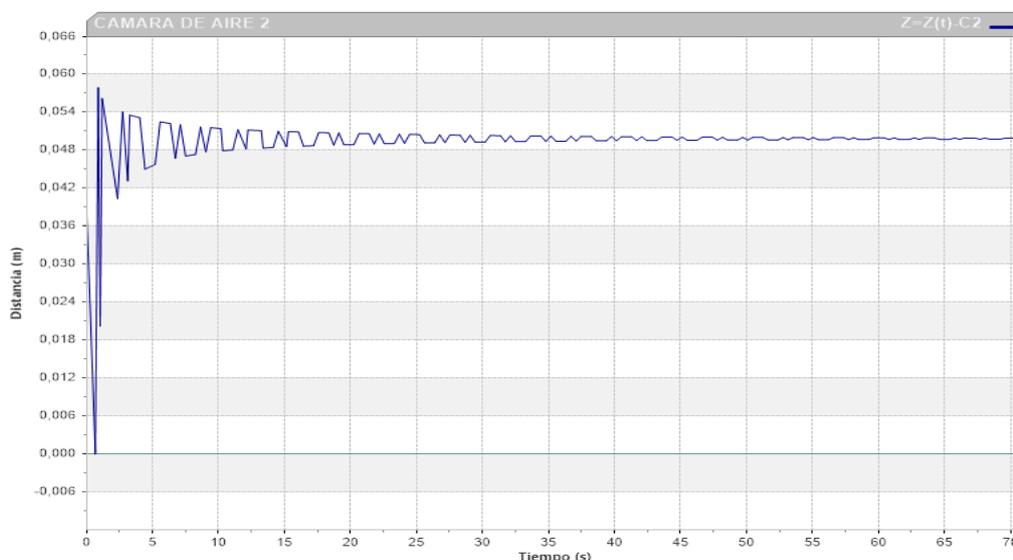
0,849999981001019	0,0579699091613293	997,279977709055	0,0499036982655525
0,999999977648258	0,0202343463897705	998,039977692068	0,0499036945402622
1,1499999742955	0,0562506392598152	998,959977671504	0,0499036647379398
2,31999994814396	0,0403876602649689	999,179977666587	0,0499036610126495
▶ 2,6999999396503	0,0541213862597942	▶ 999,999977648258	0,0499036833643913
		999,999977648258	0,0499036833643913

Z max Nivel estático

Fuente: autor

A continuación, se muestra la figura que describe el fenómeno transiente dentro del sistema hidráulico que es sometido al golpe de ariete, en el cual, se puede ver la onda de oscilación generada y las distancias que esta recorre. Véase **Figura 74**.

Figura 74. Zmax (m) vs Tiempo (s)



Fuente: autor

3.5 RESULTADOS DE LA COMPARACION Y COMPROBACION

3.5.1 COMPARACION Y COMPROBACION – MONTAJE ALMENARA

Tabla 32. Comparacion y comprobación de los métodos aplicados

CAUDAL (L/s)	Z max- Metodo Teorico (cm)	Z max - Allievi (cm)	Zmax- Modelo fisico (cm)	Δ Ecuacion vs modelo fisico (%)	Δ Allievi vs modelo fisico (%)
0,38	0,82	0,90	0,86	3,9	4,7
0,35	0,84	0,84	0,85	0,3	-0,7
0,20	0,78	0,81	0,78	-0,7	3,8

Fuente: autor

Como quedo reportado en la **Tabla 32** , se puede ver una comparación directa entre los valores obtenidos de Zmax para cada uno de los métodos aplicados, a través de, el método teórico y de ecuaciones de Armin Schoklitsch, el método numérico del software Allievi y los resultados obtenidos del modelo y montaje físico. Dicha comparación consiste en encontrar un delta de error porcentual que permite hacer una comprobación de la exactitud y eficacia de los métodos ensayados para encontrar un valor de Zmax en el sistema hidráulico, que para este caso, es la almenara. Como se muestra en la **Tabla 32**, el valor de Z max presente para el método teórico con un caudal de 0,38 l/s tiene un valor de 0,82

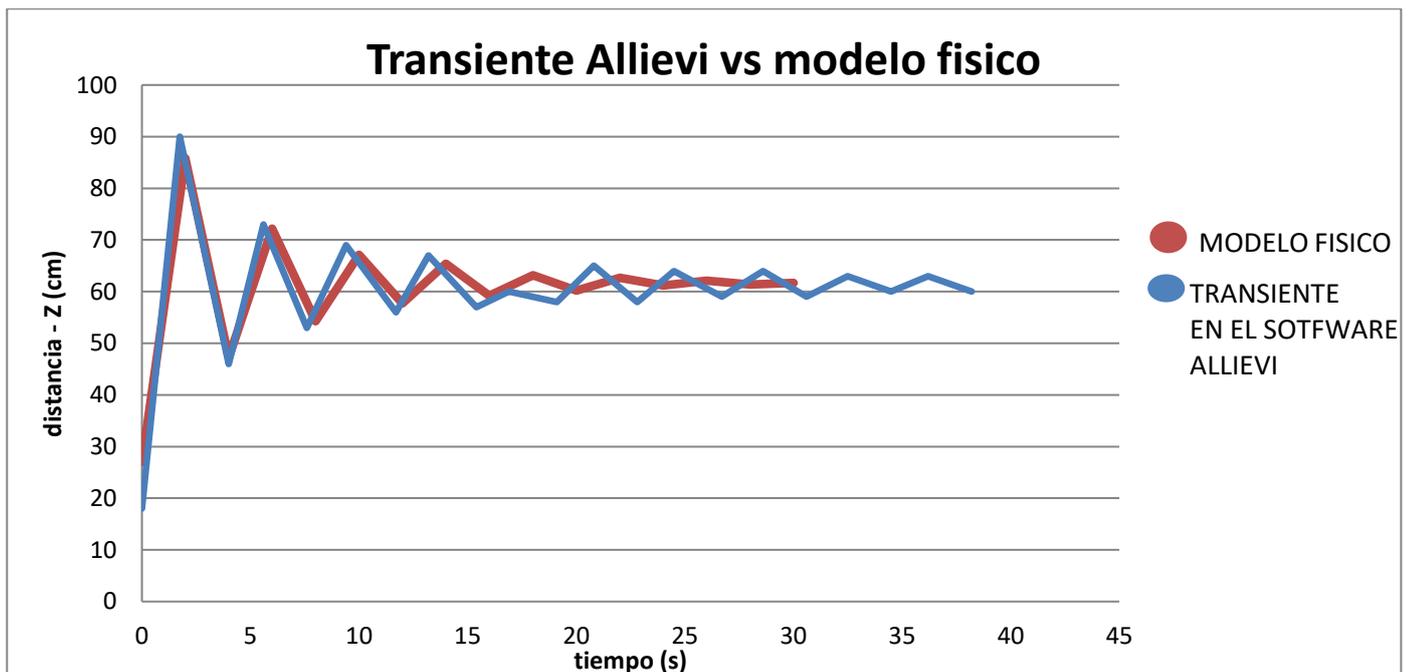
cm, con respecto al encontrado, por medio de, el montaje físico que tiene un valor de 0,86. Para obtener el valor del error porcentual y hacer la comparación entre estos dos métodos se aplica la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{0,86 - 0,82}{0,86}\right) * 100\% = 3,9 \%$$

Esta ecuación se aplica para hacer la comparación entre ecuaciones teóricas vs modelo físico y simulación en Allievi vs modelo físico, así mismo, se aplica para los otros caudales, obteniendo así los errores porcentuales para cada caso. Véase **Tabla 32**.

Se hace la comparación y comprobación del fenómeno transiente obtenido en el modelo computacional a través del software Allievi vs el obtenido en el modelo y montaje físico.

Figura 75. Transiente Allievi vs Modelo físico



Fuente: autor

La anterior **Figura 75**, muestra la comparación entre el transiente obtenido a través del software Allievi contra el obtenido a partir de los datos registrados en el modelo y montaje físico para el caudal máximo de 0,38 l/s, para lo cual, se evidencia que hay cercanía entre los puntos máximos y mínimos, es decir hay una similitud en valores de los picos entre los periodos de las oscilaciones de la onda generada, sin embargo, se percibe que Δt varían conforme el transiente

empieza a obtener valores estáticos, es decir a medida que la energía producida por el golpe de ariete se disipa, esto anteriormente dicho, se da en la simulación computacional , donde el proceso iterativo para el régimen transitorio y los tiempos que allí se toman cambian a los tomados en campo. Esta comparación también se aplica a los demás caudales donde el comportamiento de ambos métodos es similar, por lo cual se entiende que la variación y los porcentajes entre un método y el otro son bajos.

Es importante saber que para la comprobación por medio del método numérico de Allievi, el momento en el que se genera el cierre de la válvula en un tiempo determinado , que para nuestro caso fue de 0,5 segundos, el sistema pasa de estar en un régimen permanente a uno transitorio, es decir, hay un cambio significativo de energía en el sistema, esta energía de presión generada se ve reflejada en la oscilación a razón de los caudales usados, las velocidades registradas y las presiones presentes en el sistema de tubería.

3.5.2 COMPARACION Y COMPROBACION – MONTAJE CÁMARA DE AIRE

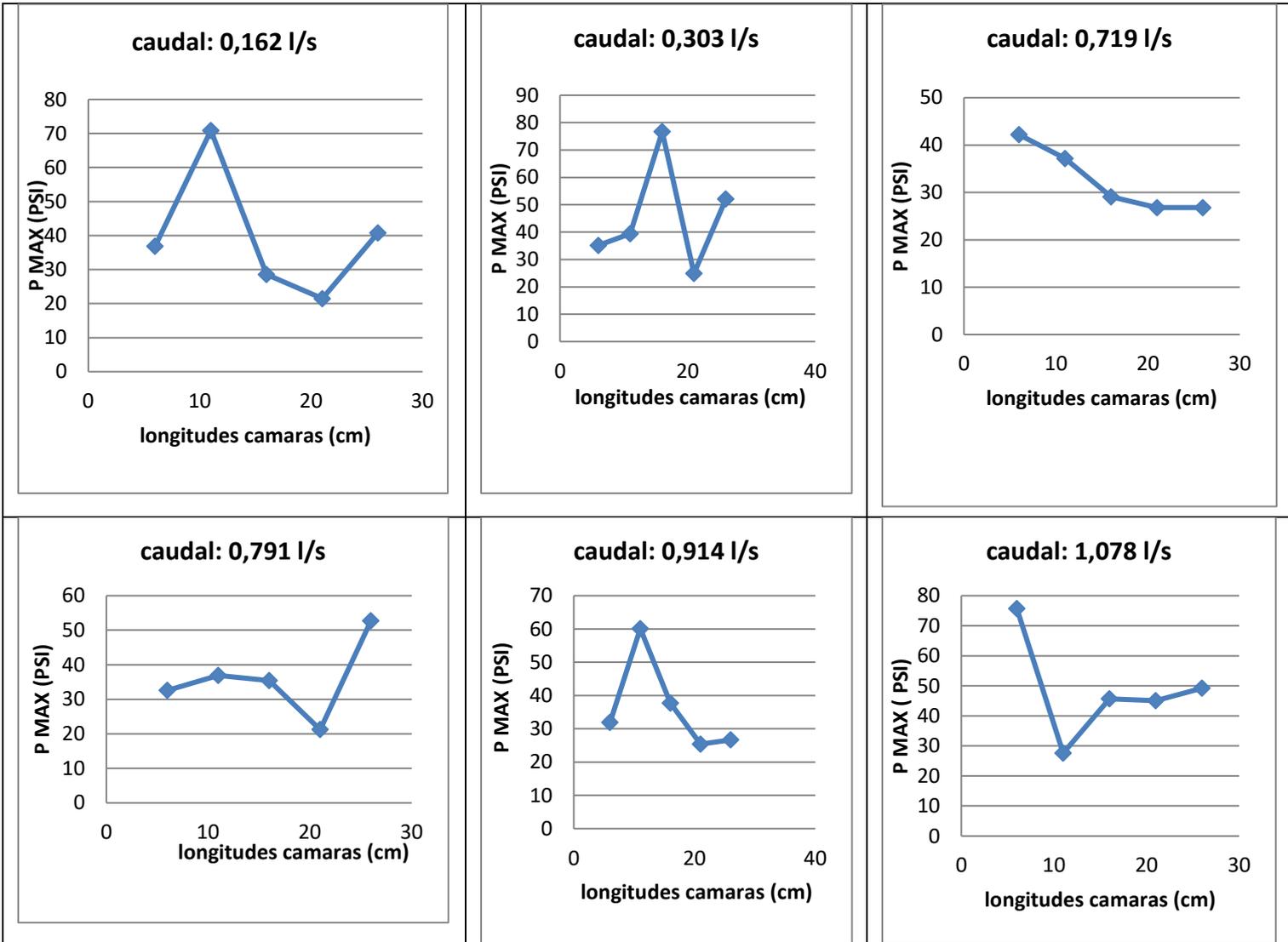
Para el análisis del montaje de cámara de quiebre de presión, a través de la recopilación de datos, se busco que en relación a las diferentes longitudes de las cámaras de aire usadas y a los caudales ensayados, se encuentre una relación de la disipación del fenómeno del golpe de ariete, al emplear este tipo de estructuras de protección a los sistemas de tuberías, para lo cual, dicha información se encuentra en la **Tabla 33** y **Tabla 34**

Tabla 33. Datos medidos en campo – mismo caudal diferente longitud de cámara de aire

RESUMEN MONTAJE CÁMARA DE AIRE							
CAUDAL - 0,162 L/s							
CAMARA DE AIRE	Nº	1	2	3	4	5	
	Longitud	6	11	16	21	26	cm
P MAX		36,9	70,9	28,6	21,5	40,8	PSI
CAUDAL - 0,303 L/s							
CAMARA DE AIRE	Nº	1	2	3	4	5	
	Longitud	6	11	16	21	26	cm
P MAX		35,1	39,4	76,7	24,9	52,1	PSI
CAUDAL - 0,719 L/s							
CAMARA DE AIRE	Nº	1	2	3	4	5	
	Longitud	6	11	16	21	26	cm
P MAX		42,2	37,2	29,1	26,8	26,8	PSI
CAUDAL - 0,791 L/s							
CAMARA DE AIRE	Nº	1	2	3	4	5	
	Longitud	6	11	16	21	26	cm
P MAX		32,6	36,9	35,4	21,2	52,7	PSI
CAUDAL - 0,914 L/s							
CAMARA DE AIRE	Nº	1	2	3	4	5	
	Longitud	6	11	16	21	26	cm
P MAX		31,9	60,1	37,7	25,4	26,7	PSI
CAUDAL - 1,078 L/s							
CAMARA DE AIRE	Nº	1	2	3	4	5	
	Longitud	6	11	16	21	26	cm
P MAX		75,7	27,6	45,7	45	49,2	PSI

Fuente: autor

Figura 76. Graficas P max vs Longitudes de cámaras de aire



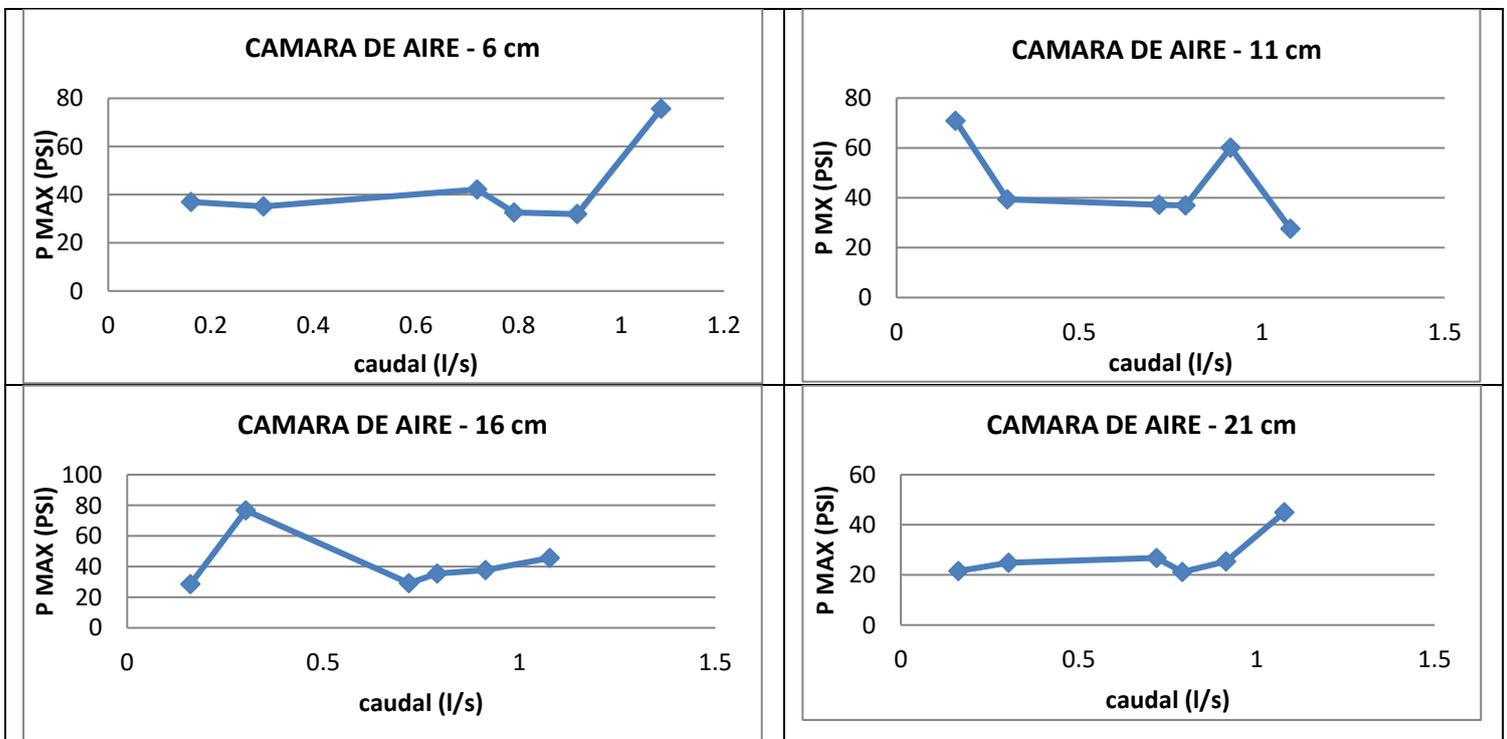
Fuente: autor

Tabla 34. Datos medidos en campo – misma longitud de cámara de aire, diferente caudal.

RESUMEN MONTAJE CÁMARA DE AIRE							
camara de aire - longitud : 6 cm							
caudal	0,162	0,303	0,719	0,791	0,914	1,078	l/s
P MAX	36,9	35,1	42,2	32,6	31,9	75,7	PSI
camara de aire - longitud : 11 cm							
caudal	0,162	0,303	0,719	0,791	0,914	1,078	l/s
P MAX	70,9	39,4	37,2	36,9	60,1	27,6	PSI
camara de aire - longitud : 16 cm							
caudal	0,162	0,303	0,719	0,791	0,914	1,078	l/s
P MAX	28,6	76,7	29,1	35,4	37,7	45,7	PSI
camara de aire - longitud : 21 cm							
caudal	0,162	0,303	0,719	0,791	0,914	1,078	l/s
P MAX	21,5	24,9	26,8	21,2	25,4	45	PSI
camara de aire - longitud : 26 cm							
caudal	0,162	0,303	0,719	0,791	0,914	1,078	l/s
P MAX	40,8	52,1	26,8	52,7	26,7	49,2	PSI

Fuente: autor

Figura 77. Graficas P max vs Caudal



Fuente: autor

Para la **Figura 76** y la **Figura 77** se hace un análisis de regresiones exponencial, lineal, logarítmica, polinómica y potencial y se encuentra en la mayoría de los casos que el factor R^2 es menor a 0,5, esto quiere decir que, ninguna de las regresiones anteriormente mencionadas, representa de una forma correcta o se acomoda a la dispersión de puntos que se tiene en cada una de las gráficas, en base a esto, se recomienda evaluar otro tipo de regresión que permitan representar y obtener valores del coeficientes de relación mayores, para de esta forma, poder encontrar una ecuación que en función del diámetro, longitud o caudal, permita conocer con mayor precisión, cual es la cámara de aire que se debería usar y que en dicho caso, disipe mejor el efecto del golpe de ariete en sistema hidráulico.

En base a estos resultados mostrados, se llega a conocer que de las cámaras de aire ensayadas, la que mejor represento una disipación de energía de presión en régimen transitorio es la cámara N° 4, que corresponde a una longitud de 21 cm y con diámetro de $\frac{1}{2}$ " (21mm), pues como se sabe, cuando se efectúa el procedimiento sin la presencia de una cámara de aire, la presión generada es alta al momento del cierre de la válvula, por lo cual al incluir esta cámara de aire en el sistema, en el instante cuando se cierra la válvula se pasa de tener un valor de 85,2 PSI a valores que en promedio se encuentran entre 28,6 PSI, representando una disminución significativa en el efecto del golpe de ariete en el sistema hidráulico.

4. CONCLUSIONES

- Los métodos utilizados para la comparación entre las ecuaciones de Armin Schoklitsch y el método numérico del programa Allievi son exitosos y validos para comprobación de los datos registrados y tomados en campo, permitiendo de esta manera obtener resultados de errores porcentuales, que se pueden traducir en errores humanos y fallos en las calibraciones del montaje físico.
- De acuerdo a las ensayos y datos tomados para la cámara de aire, no se encuentra una ecuación de regresión que se ajuste a la dispersión de puntos, para ensayos en los cuales se varié el caudal y la longitud de la cámara de aire, en base a esto, se consideraría buscar otro método que permita comparar y validar los datos tomados en el montaje físico.
- El tiempo de cierre de la válvulas de regulación para cada uno de los sistemas hidráulicos, es de vital importancia, pues es esta la encargada de que se refleje la variación del nivel de agua dentro de las estructuras de protección, el cómo se forma y comporta la onda de choque o sobrepresión y así mismo el efecto que tienen estas estructuras de protección frente al golpe de ariete generado.
- El uso e implementación de estas estructuras de protección en sistemas hidráulicos compuestos por tuberías y bombas es necesario cuando se tienen registros elevados de presiones generadas por el cierre brusco que válvulas, ya que esta energía de presión es causa de rompimiento y daño de tuberías y averías en las instalaciones hidráulicas.
- Para encontrar la cámara que mejor se ajusta a la disipación de energía, se concluye que las que mejor comportamiento tienen son las que mayor volumen de aire contienen entre ellas, es decir, las que mayor longitud tengan y en su caso las que mayor diámetro presenten.
- Se destaca la importancia del uso de estructuras de protección, para el análisis de flujo inestable en las instalaciones de energía hidráulica. Así mismo la importancia de la ubicación de estas estructuras en un sistema hidráulico que contenga redes de tuberías, ya sean ubicadas estas estructuras aguas arriba o aguas abajo, para tener un equilibrio en las presiones.

5. RECOMENDACIONES

- Es importante modificar el montaje físico de la bobina, donde se pueda instalar una cámara de aire justo antes de la tubería de cobre, donde se pueda controlar mejor el fenómeno de supresión.
- Sería bueno poder modificar el montaje físico de la almenara, donde se pueda incluir otra estructura de protección u otro tipo de almenara, con medidores más precisos que permita obtener valores de presiones y alturas más exactos. Así mismo, que se pueda hacer varias mediciones del fenómeno del golpe de ariete y como este se puede mitigar de una mejor manera.
- Es importante poder encontrar una ecuación de regresión que se ajuste al montaje físico de la bobina que contiene la cámara de aire, de esta manera se podría comparar y validar los datos tomados, una opción que no se evaluó es la variación del diámetro de las cámaras de aire.
- Una alternativa sería poder evaluar otro tipo de fluidos en los montajes físicos, de esta manera se podría determinar si el impacto del golpe de ariete varía conforme el fluido que se evalúa
- Instalar un dispositivo en el montaje físico de la cámara de aire que permita saber la cantidad de aire que se le quiere impregnar al sistema hidráulico para poder tomar datos y saber la cantidad de aire que se requiere para mitigar el golpe de ariete.

6. BIBLIOGRAFIA

BOHORQUEZ, David. VELASQUEZ, Camilo. Montaje de un modelo físico para la prueba de la incidencia del fenómeno de golpe de ariete e diversas longitudes de tubería. Bogotá D.C, 2015, 84p. Trabajo de investigación. Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

WOOD, Don J. LINGIREDDY, Srinivasa. BOULOS, Paul F. KARNEY, Bryan W. Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems [en línea] July 2005. [citado: 29, mar, 2019]. Disponible en internet: http://kypipe.com/new_stuff/pubs/JAWWAJUL05_No97Vol7_WOOD.pdf

JUNG, Bong Seog. KARNEY, Bryan W. BOULOS Paul F. WOOD Don J. The need for comprehensive transient analysis of distribution systems. [en línea] may 2005. [citado: 29, mar, 2019]. Disponible en internet: http://kypipe.com/new_stuff/pubs/JAWWAJAN07_No99Vol1_WOOD.pdf

SHIRI P. M. Mane. Criteria for hydraulic desing for the surge tank. En: Indian Standard. Part 2 (oct.1985) p. 3-5.

STROJNIŠKI, Vestnik. Simulation of Transient Flow in Hydroelectric Power Plants Using Unsteady Friction. [en línea] 2009 [citado: 14, mar, 2019]. Disponible en internet: https://www.researchgate.net/profile/Mehrdad_Raisee_Dehekordi/publication/279462120_Simulation_of_Transient_Flow_in_Hydroelectric_Power_Plants_Using_Unsteady_Friction/links/55b95fa308aec0e5f43c3376/Simulation-of-Transient-Flow-in-Hydroelectric-Power-Plants-Using-Unsteady-Friction.pdf.

PAK. J. Engg. Hydraulic Transient Analysis of Surge Tanks: Case Study of Satpara and Golen Gol Hydropower Projects in Pakista. [en línea] 2011. [Citado: 14, mar, 2019]. Disponible en internet: <http://docplayer.net/50675199-Hydraulic-transient-analysis-of-surge-tanks-case-study-of-satpara-and-golen-gol-hydropower-projects-in-pakistan.html>.

VARGAS, Omar. JIMENES, Oscar. Protección de conducciones mediante tanques de oscilación con orificios. [en línea]. 1996. [citado: 14, mar, 2019]. Disponible en internet: https://www.researchgate.net/publication/283091832_PROTECCION_DE_CONDUCCIONES_MEDIANTE_TANQUES_DE_OSCILACION_CON_ORIFICIOS

BOULOS Paul F. KARNEY Bryan W. WOOD Don J. LINGIREDDY Srinivasa. Hydraulic transient guidelines for protecting wáter distribution systems. [en línea] May 2005. [citado: 29, mar, 2019]. Disponible en internet: http://kypipe.com/new_stuff/pubs/JAWWAMAY05_No97Vol5_WOOD.pdf

CHAUDHRY M. Hanif. applied hydraulic transients. Primera edición. Canada, Vancouver. 266p.

Nie, W. P., & Shi, C. (2012). Study on dynamic stability of large-scale underground cavern group during construction period of hydropower station. *Applied Mechanics and Materials*, 152-154, 820. doi:<http://dx.doi.org.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.820>.

Wang, C., Yang, J., & Nilsson, H. (2015). Simulation of water level fluctuations in a hydraulic system using a coupled liquid-gas model. *Water*, 7(8), 4446-4476. doi:<http://dx.doi.org.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/10.3390/w7084446>

LAHLOU, Z. Michael. Golpe de Ariete [en línea]. [citado: 14, mar,2019]. Disponible en internet:http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/spanish/water_hammer_DWFSOM141.pdf

STREETER, I Victor. Fluid transients (2004). United States of America. 379p.

VALENCIA, U. P. Allievi [en línea] 2015 [citado: 20, ago., 2015]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.allievi.net>: <http://www.allievi.net/allievi-es.php>>.

Wylie, E. B. and Streeter, V. L. (1993). Fluid transients in systems, Prentice Hall, New Jersey, US.

S Mahmood, J. M. (2018). The steady-transient optimization of water transmission pipelines with consideration of water-hammer control devices: A case study. *Journal of Water Supply : Research and Technology - AQUA*, 67(6), 556-565. doi:<http://dx.doi.org.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/10.2166/aqua.2018.018>

Moghaddas, S. M., Samani, H. M., V., & Haghghi, A. (2017). Transient protection optimization of pipelines using air-chamber and air-inlet valves. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1991-1997. doi:<http://dx.doi.org.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/10.1007/s12205-016-0836-4>

ANEXOS

- Hojas de cálculo en Excel: en estas hojas se calculo se encuentra compilada toda la información de los datos tomados en campo de los montajes físicos (almenara y cámara de aire), así mismo se evidencia las graficas que describen el fenómeno transiente para cada uno de los montajes. Adicional, existe la presencia de hojas de cálculo en las que se encuentran las tablas comparativas entre métodos y validación de resultados.
- Artículos y libros consultados: en la carpeta de artículos y libros consultados se encuentra en formato PDF, todos los artículos, revistas y demás libros de autores importantes como lo son Chaudry, Streeter, entre otros y que fueron de utilidad para la elaboración de este documento y trabajo de investigación.
- Registro fotográfico: en la carpeta de registro fotográfico se encuentran las fotos y evidencias de que el autor de este documento realizo las pruebas de laboratorio necesarias y estuvo presente tomando los datos que serian utilizados en la elaboración de este proyecto.
- Simulaciones Allievi: en la carpeta que tiene por nombre simulaciones Allievi , se encuentran las dos simulaciones que se realizaron el software Allievi y que serian de utilidad para la comprobación y validación de los datos obtenidos mediante los modelos físicos y los métodos teóricos.